

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Hidroponia em Ambiente Controlado: desenvolvimento de
uma metodologia de análise ao desempenho produtivo e aos
consumos de uma unidade de produção**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Luis António Moura Rebelo

Dissertação orientada por:
Jorge Augusto Mendes de Maia Alves (Universidade de Lisboa)
Cathy Béatrice Kurz Besson (Universidade de Lisboa)

Resumo

Este trabalho procurou desenvolver um método de desenho e de abordagem analítica ao desempenho funcional de uma unidade de produção em hidroponia em ambiente controlado, que se demonstrasse exequível, capaz de produzir uma parametrização integral da estrutura da unidade de produção e no final da sua aplicação produzisse um quadro de simulações que incluísse os resultados da sua produtividade e consumos vários. Tal análise serviria para o estabelecimento de uma comparação alargada de desempenho entre a unidade de produção construída, e outros métodos de produção agrícola mais ou menos convencionais. Optou-se por considerar para a discussão neste trabalho, somente as áreas cuja caracterização para a unidade de produção se consideram prioritárias. Este trabalho compreende assim o estudo detalhado da montagem da estrutura dos circuitos, pensada numa lógica relacional de objetos funcionais; no enquadramento da técnica de crescimento escolhida na estrutura funcional do circuito; e num estudo analítico do desempenho hidráulico/fisiológico da circulação da solução nutritiva ao longo de toda a estrutura funcional do circuito. A natureza do trabalho é toda ela, teórica, computacional e analítica, não se tendo considerado a execução de uma análise experimental para testar empiricamente nenhum parâmetro do circuito. Sempre que necessário fixaram-se os parâmetros de desenho dos circuitos fazendo uso de valores já caracterizados noutros estudos empíricos de circuitos e unidades hidropónicas, e no restante do circuito, fez-se recurso a métodos e programas de simulação e análise fundamental que descrevessem adequadamente o seu comportamento hidráulico. Tal como está, o trabalho permite identificar, para efeitos do estudo da estrutura funcional e hidráulica dos circuitos de crescimento, uma abordagem mista entre consulta empírica, construção lógica, e simulação e análise funcional, que permite chegar a relações entre o desempenho hidráulico, a construção estrutural e a produtividade fisiológica dos circuitos de crescimento. É um estudo que se distingue de uma boa parte da literatura pelo ângulo analítico detalhado segundo o qual considera a relação da produtividade fisiológica dos circuitos com a qualidade hidráulica dos seus escoamentos e da sua estrutura, e sugere que o mesmo poderá vir a ser reproduzido com sucesso para as restantes áreas de estudo da unidade de produção.

Palavras-chave: hidroponia, agricultura em ambiente controlado, circuitos de crescimento

Abstract

This work aimed to develop a method of design and analytical approach to the study of functional performance of an hydroponic production unit in controlled environment agriculture, which proved itself workable, capable of producing an integral parametrization of the unit structure, and, at the end of its application, produced a set of simulations that included results for its productivity and consumptions. Such analysis would serve the purpose of establishing a broad comparison between the built production unit, and other methods of agricultural production, more or less conventional. We chose to discuss in this work only the areas of study which characterization deemed priority. So this work comprehends the detailed study of the circuits structure, thought in a logic of relational functional objects; the framing of the growing technique in the functional structure of the circuit; and the analytical study of the hydraulic/physiological performance of the solution flow over the entire functional structure of the circuit. The nature of the work is mostly theoretical, computational and analytical, having not been considered the execution of any experimental analysis in order to test empirically some of the circuit parameters. When it seemed necessary the design parameters of the unit were fixed by recurring to the literature about hydroponic production units, and in the rest of the design, the parameters were simulated and calculated, using simulation software and fundamental analysis that adequately described the hydraulic behavior of the circuit. As it is, the work allows for the identification of a study approach of the relationship between the circuit structure, its hydraulics and its productivity performance. It's a study that distinguishes itself by the detailed angle through which considers this same relationship and suggests that the same could be applied with success to the study of the remaining areas of the study in the production unit.

Keywords: hydroponics, controlled environment agriculture, growth circuits

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos de estudo	3
1.2 Motivação.....	4
1.3 Resumo da Metodologia.....	5
1.4 Contribuição científica do trabalho	7
1.5 Estrutura do trabalho	7
2. Contexto e revisão bibliográfica.....	8
2.1 Introdução e metodologias usadas em estudos sobre unidades hidropónicas	8
3. Metodologia do estudo	10
3.1 Introdução ao ambiente e ao método: definição prévia das variáveis	10
3.1.1 Caraterização do ambiente interior.....	11
3.1.2.1 Caraterização dos circuitos de crescimento - <i>do seu desenho gráfico, da sua montagem conceptual e da sua análise funcional e de desempenho</i>	11
Estudo Gráfico	12
Hidráulica.....	72
4. Conclusões.....	99
Bibliografia.....	101

Lista de Figuras

Figura 1 – Ordem lógica do desenho ordenado para pensar a construção de uma unidade de produção em hidroponia.....	6
Figura 2 - Esquema diagramático do perfil de um circuito com técnica hidropônica DFH (fonte: http://www.medicalmarijuanaadvisor.net/ , 2015).....	10
Figura 3 – Esquema diagramático do perfil de um circuito com técnica hidropônica NFT (fonte: https://hydroponicsinformation.wordpress.com/2013/04/21/nfthydroponics/ , 2015)	11
Figura 4 - Corte de camada de uma árvore de desenho produzida para circuito(s) genérico(s) desenvolvido(s) por adição de níveis de estrutura. Vista antes da diferenciação das estruturas por circuito correspondente.	14
Figura 5 - Corte de camada de duas árvores de desenho produzidas para dois circuitos genéricos desenvolvidos por adição de níveis de estrutura. Vista após diferenciação das estruturas por circuito correspondente.	14
Figura 6 - Legenda dos objetos/elementos da estrutura zonal presentes no diagrama esquemático das estruturas de zona.....	22
Figura 7 - Diagrama esquemático ilustrativo de uma estrutura zonal, fazendo uso dos elementos da figura2.	22
Figura 8 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento do <i>nível de estrutura de zonas</i>	26
Figura 9 - Matriz de parametrização de <i>campos de desempenho</i> usada na caracterização do <i>nível de estrutura de campos</i> aplicado ao estudo dos presentes circuitos.....	28
Figura 10 – Estrutura de campos <i>SinglePond</i> : figura e perfil de realce das zonas de escoamento.	34
Figura 11 – Estrutura de campos <i>TriangleStand</i> : figura e perfil de realce das zonas de escoamento.....	35
Figura 12 – Estrutura de campos <i>LongStand</i> : figura e perfil de realce das zonas de escoamento.	35
Figura 13 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos <i>níveis de estrutura de zonas</i> e de <i>estrutura de campos</i>	36
Figura 14 - <i>Matriz tipológica de parametrização do vetor de alimentação</i> , usada na caracterização do nível de estrutura de alimentação.	37
Figura 15 – Legenda dos elementos presentes nos diagramas esquemáticos das redes de alimentação de caudal da zona1, dos nossos circuitos.	39
Figura 16 – Estrutura de alimentação (EA ₁) com quadro de parâmetros.	40
Figura 17 – Estrutura de alimentação (EA ₂) com quadro de parâmetros.....	40
Figura 18 - Estrutura de alimentação (EA ₃) com quadro de parâmetros.....	41
Figura 19 - Estrutura de alimentação (EA ₄) com quadro de parâmetros.....	41
Figura 21 - Estrutura de alimentação (EA ₅) com quadro de parâmetros.....	42
Figura 22 - Estrutura de alimentação (EA ₆) com quadro de parâmetros.....	42
Figura 23 - Estrutura de alimentação (EA ₇) com quadro de parâmetros.....	43
Figura 24 - Estrutura de alimentação (EA ₈) com quadro de parâmetros.....	43
Figura 25 - Estrutura de alimentação (EA ₉) com quadro de parâmetros.....	44
Figura 26 - Estrutura de alimentação (EA ₁₀) com quadro de parâmetros	44
Figura 27 - Estrutura de alimentação (EA ₁₁) com quadro de parâmetros	45
Figura 28 - Estrutura de alimentação (EA ₁₂) com quadro de parâmetros	45
Figura 29 - Estrutura de alimentação (EA ₁₃) com quadro de parâmetros	46

Figura 30 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos níveis de <i>estrutura de zonas</i> , <i>estrutura de campos</i> e <i>estrutura de alimentação</i>	47
Figura 31 – Parâmetros importantes da <i>estrutura de peças</i> que vem fixos por <i>condicionalidade herdada</i> dos níveis de estrutura (de circuito) anteriores.	49
Figura 32 - <i>Matriz tipológica de parametrização de peças</i> usada na caracterização do <i>nível de estrutura de peças</i>	49
Figura 33 - Figuras com esquema diagramático dos <i>depósitos_comunicantes_independentes</i> empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	57
Figura 34 - Figuras com esquema diagramático do <i>depósitos_único_tanque</i> empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	58
Figura 35 - Figuras com esquema diagramático dos <i>distribuidores</i> de solução <i>pdp</i> empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	59
Figura 36 - Figuras com os esquemas diagramáticos dos <i>distribuidores</i> de solução <i>wtrhldr</i> empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	60
Figura 37 - Figuras com esquema diagramático dos <i>distribuidores</i> de solução <i>bivalve</i> e <i>tubetree</i> empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	60
Figura 38 - Figuras com esquema diagramático de todos os <i>divisores</i> de solução empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	62
Figura 39 - Figuras com esquema diagramático das <i>calhas de alimentação de solução</i> empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	66
Figura 40 - Figuras com esquema diagramático das <i>calhas de coleção</i> de solução empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	67
Figura 41 - Figuras com esquemas diagramáticos dos <i>coletores</i> de solução empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em <i>mm</i>	69
Figura 42 – Quadros identificativos de quais as peças presentes em cada estrutura de peças constituída a uso no desenho dos nossos circuitos.	71
Figura 43 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos níveis de <i>estrutura de zonas</i> , <i>estrutura de campos</i> , <i>estrutura de alimentação</i> e <i>estrutura de peças</i>	71
Figura 44 - Fotografias de fachadas de alimentação em <i>NFT</i> e pormenor do distribuidor (fonte: http://boards.cannabis.com/growing-information/191809-would-you-buy-vertical-growing-unit.html , 2015).	73
Figura 45 – Canais de crescimento de secção retangular para plantas em técnica <i>NFT</i> . (http://www.vefi.no/channels-gutters/category165.html)	87
Figura 46 - Ilustração da relação do <i>número de Froude</i> com as velocidades de propagação do escoamento e da perturbação no canal (esquerda); Impacto do <i>número de Froude</i> no perfil do escoamento perturbado por queda livre (direita). Imagens retiradas de [16].	89
Figura 47 – As raízes das plantas ocupam o interior das calhas de crescimento na zona2, alterando o perfil de escoamento, $y(x)$, que se desenvolve no interior das calhas.	91
Figura 48 – Código de cores do par $Fr : y \in 1 - 3mm$ como aplicado ao desenho das tabelas 33, 34 e 35.	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de avaliação de desempenho alargado das unidades de produção.....	3
Tabela 2 - Quadro-resumo das características genéricas dos níveis de estrutura produzidos para o nosso trabalho.....	16
Tabela 3 - Quadro-resumo dos <i>parâmetros de zona</i> constituintes dos <i>vetores de zona</i>	18
Tabela 4 - Quadro descritivo das zonas disponíveis para caraterização das <i>estruturas de zona</i> produzidas.	20
Tabela 5 – Atribuições de <i>handles</i> válidas para o modo de actividade [<i>1fachada,1face</i>]	23
Tabela 6 – Atribuições de <i>handles</i> válidas para o modo de actividade [<i>1fachada,2faces</i>].....	23
Tabela 7 – Atribuições de <i>handles</i> válidas para o modo de actividade [<i>2fachadas,1face</i>].....	24
Tabela 8. Atribuições de <i>handles</i> válidas para o modo de actividade [<i>2fachadas,2faces</i>]	24
Tabela 9. Quadro-resumo das estruturas de zona usadas para desenvolvimento dos circuitos do trabalho.....	25
Tabela 10 - Quadro-resumo dos <i>parâmetros de campo</i> constituintes das <i>matrizes de campos de desempenho</i> do <i>nível de estrutura</i> de campos.	28
Tabela 11 – Atribuições à matriz de campos de desempenho que foram estudadas.	33
Tabela 12 – Quadro-resumo dos subscritos de identidade utilizados na atribuição aos parâmetros da matriz <i>vector de alimentação</i>	37
Tabela 13 - Quadro-resumo dos parâmetros de ajuste constituintes do <i>vetor campo de desempenho de alimentação da solução</i> do <i>nível de estrutura de alimentação</i> do circuito.	38
Tabela 14 - Listagem descritiva das <i>estruturas de alimentação</i> produzidas e estudadas no presente trabalho.	46
Tabela 15 - Quadro-resumo dos <i>parâmetros de ajuste</i> constituintes da <i>matriz de parametrização de peças</i> do <i>nível de estrutura de peças</i> do circuito.....	49
Tabela 16 – Listagem de todas as peças tipo <i>depósito</i> produzidas a partir de atribuição de valores aos <i>parâmetros de ajuste de estrutura</i> definidos na categoria correspondente da tabela(14).....	56
Tabela 17 - Listagem das peças tipo <i>distribuidor</i> construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(14).	58
Tabela 18 – Quadro resumo dos métodos de escoamento aplicados em cada modelo de distribuidor	61
Tabela 19 - Listagem das peças tipo <i>divisor</i> construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(). Estas peças foram utilizadas posteriormente na montagem/construção/constituição de <i>estruturas de peça</i> para o desenho dos circuitos.	61
Tabela 20 - Listagem das peças tipo <i>coletor</i> construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(). Estas peças foram utilizadas posteriormente na montagem/construção/constituição de <i>estruturas de peça</i> para o desenho dos circuitos.	67
Tabela 21 – Zona de escoamento com componentes, contribuição funcional para o circuito e parâmetros de desempenho a determinar.	72

Tabela 22 – Fases de análise, componentes e análise aplicada na fase, para cada circuito.....	77
Tabela 23 – Regiões fronteira do escoamento na fase de distribuição da zona 1 e condições exigidas aos resultados das simulações para as simulações em FS.....	78
Tabela 24 - Caudal de entrada na zona 1 calculado para cada um dos circuitos, segundo a eq.35.	79
Tabela 25 – Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ3, ECD3.	82
Tabela 26 - Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ2, ECD2.	82
Tabela 27 - Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ1, ECD1.	83
Tabela 28 – Caraterísticas do escoamento gravítico nas tinas de distribuição, assumindo a hipótese do preenchimento uniforme de fluido na tina.	84
Tabela 29 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ3,ECD3), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.....	85
Tabela 30 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ2,ECD2), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.....	86
Tabela 31 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ1,ECD1), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.....	86
Tabela 32 – Parâmetros de controlo hidráulico que governam a qualidade dos escoamentos na zona 2.	91
Tabela 33 – Variáveis de controlo hidráulico usadas no controlo dos escoamentos da zona2 e a efetiva atribuição em cada circuito.....	93
Tabela 34 – $Yn[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ3, ECD3.....	93
Tabela 35 - $Yn[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ2, ECD2.....	94
Tabela 36 - $Yn[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ1, ECD1.....	94
Tabela 37 - Volumes de água hipotetizados para os escoamentos nas calhas de crescimento e de colecção, das zonas 2 e 3, respectivamente.....	95
Tabela 38 - Características da bombagem na realimentação de água nos circuitos.	96
Tabela 39 - Volumes de água em permanência discriminados pelos diversos componentes dos circuitos aos quais pertencem.....	97
Tabela 40 - Quadro-resumo do desempenho hidráulico dos circuitos como definido pelos devidos parâmetros de desempenho apresentados na Tabela 21.....	98

1. Introdução

A hidroponia é em si uma recolção de procedimentos técnicos que permite o crescimento de plantas em solução mineral nutritiva sem a presença de solo. Também é conhecida por cultivo sem solo. O uso moderno da hidroponia começa nos anos de 1930, por W.F.Gericke da Universidade da Califórnia, que usou a cultura em água para crescer plantas como tomates, beterrabas, cenouras, batatas, frutas, flores e outras. Já nos anos 1940, a força aérea dos EUA usa sistemas hidropónicos para crescer vegetais frescos para as tropas estacionadas em pequenas ilhas no Pacífico. Atualmente existem sistemas hidropónicos em todo o mundo, incluindo áreas sem solo arável como no México e no Médio Oriente. Quase todas as plantas terrestres podem ser crescidas usando hidroponia, no entanto, colheitas de alto valor de mercado são normalmente plantadas primeiro, numa exploração, como forma de retornar mais rapidamente os custos iniciais do investimento [2].

Em hidroponia o solo é substituído por um meio inerte de suporte, com ou sem substrato, uma solução nutritiva dissolvida, e um rizoma bem arejado, quer pela oxigenação da solução por difusão à superfície, injeção de bolhas no corpo da solução ou pelo envolver de uma porção relevante do rizoma em meio atmosférico [2] [9].

As principais desvantagens das técnicas hidropónicas prendem-se com o potencial para a propagação de doenças através dos circuitos de solução interligados, ou a necessidade, em algumas técnicas, de ter sempre uma fonte de energia ligada a bombear água ou a injetar solução nutritiva. Isto sem considerar outros equipamentos eléctricos usados para controlar ativamente o ambiente climático interior à unidade [1] [9] [14].

Existem muitas variantes de técnicas hidropónicas usadas por todo o mundo, mas quase todas caem em alguma das seguintes três famílias: *nutrient film technique* (NFT), *water culture technique* ou *deep flow hydroponics* (DFH), e *ebb and flow*. No presente trabalho utilizaram-se as técnicas NFT e DFH que serão melhor desenvolvidas em tópico próprio [2].

Outros aspetos que se devem ter em atenção quando se considera a aplicação de técnicas hidropónicas ao crescimento de uma dada espécie de plantas são a manutenção da poda, o controlo de pestes e o método de colheita. Estes tópicos não serão abordados no presente trabalho.

O potencial das técnicas hidropónicas em ambiente controlado, para uso no filão da agricultura urbana e periurbana em meio edificado está detalhadamente explicado e identificado no livro de D.Despommier, *The Vertical Farm – Feeding the World in the 21st Century*, sendo que aqui fazemos um apanhado das principais ideias deste texto e de artigos adicionais.

Primeiro que tudo o potencial de ser em ambiente controlado possibilita a regulação otimizada do meio ambiente interior no qual cresce a colheita, tanto no ambiente dos rizomas, como na estrutura aérea da planta, induzindo maiores produtividades e períodos alargados de crescimento, i.e. época de crescimento, durante todo o ano. Todos os parâmetros do ambiente de crescimento podem ser controlados usando esta técnica, desde temperaturas do ar e dos rizomas, à solução nutritiva, passando pela humidade do ar, composição em CO₂ atmosférico, radiação e hidráulica, desenho da estrutura funcional e a técnica empregue, entre outros. O desenho estrutural de uma unidade deve dar proteção contra o dano eólico, pluvial, os extremos de temperatura e radiação, as pragas e as pestes, ao mesmo tempo que permite uma adequada iluminação das estruturas fotossintéticas das plantas. Apesar das possibilidades desta técnica, hoje em dia ainda prevalece o controlo passivo do ambiente interior de crescimento que faz uso de uma envolvente energética do tipo estufa [9].

A hidroponia em ambiente controlado permitirá em teoria reduzir o espaço necessário para produzir um mesmo volume de colheita, ou de outra forma, apresenta melhores produtividades que a agricultura convencional à base de solo e que a agricultura em estufa, isto porque evita os três principais elementos que mitigam a produtividade numa exploração agrícola – a variabilidade climática, o solo como meio de reprodução e propagação de grande volume dos patogénicos,

pestes e pragas danosas para a reprodução e crescimento das plantas, e a competição dos rizomas por espaço de armazenamento de nutrientes no solo [1] [2] [9] [14].

As variedades podem assim ser crescidas em condições selecionadas e controladas que garantem taxas de crescimento ótimas para cada espécie de plantas durante todo o ano. Segundo [14], as produtividades de um plano de produção numa quinta vertical, excedem 10-20 vezes a produtividade de um plano de produção de área equivalente numa quinta tradicional. Já em [3] os autores sugerem que o número de tubérculos por planta, colhidos em hidroponia, pode ser de 147-1500% superior aos valores colhidos em técnicas convencionais de cama e saco com substrato [3].

Este potencial para poupança de espaço pode ajudar a mover a produção agrícola para espaços menores em meio urbano e retirar a pressão do uso da terra agrária em meio extra-urbano, libertando-a desta forma para outros usos. Transitar esta produção para as cidades implicaria o uso de edifícios adaptados ao efeito. Dado o potencial para produção de riqueza e valorização do espaço imobiliário, e por extensão, do solo edificado, estes empreendimentos seriam excepcionalmente indicados para aplicar em solos baratos nas cidades, diminuindo o seu custo inicial de implementação, e aumentando o seu potencial para retorno, coincidindo adicionalmente com o edificado abandonado e com as populações urbanas de zonas mais desfavorecidas. Seria uma forma de criar um volte face económico na base local de produção e geração de riqueza de zonas urbanas mais desfavorecidas [14].

Existe também um potencial para poupança de combustível fóssil, que se explica das seguintes formas. Ao aproximarmos a produção do consumo, colocando a produção nas cidades, estaríamos a diminuir a necessidade de *food miles* envolvidas no processo de transporte e distribuição da comida, desde a produção até ao consumo [14] [15]. Os gastos com refrigeração durante o transporte e a distribuição seriam igualmente obviados [14] [15]. Adicionalmente, poupar-se-ia combustível, por não ser necessário preparar largas extensões de terreno, com maquinaria, nomeadamente em aragem, fertilização, sementeira, remoção de daninhas e colheita [6] [14] [15].

Uma unidade hidropónica em ambiente controlado pode ser adicionalmente pensada para funcionar como um sistema fechado a nível de consumo de água, o que muda o consumo de água de um fluxo em circuito aberto, para um volume em permanência, que só tem de ser re-circulado e tratado, explorando-se assim um potencial para poupança de água, por colheita, bastante elevado¹ [6]. Em [8] os autores apontam que em hidroponia de circuito fechado com recirculação de solução somente se utiliza 4% da água que de outra forma se utilizaria num sistema de irrigação aberta convencional em solo. Já no estudo [2] os autores apontam para um valor de 10% do total da água utilizada em irrigação em solo. Adicionalmente, ao funcionar em ambiente fechado em edificado, a unidade pode recuperar a água transpirada pelas plantas, através da condensação da humidade do ar.² Esta valência de racionalização do consumo de água é tanto mais importante quanto atualmente cerca de 70% de toda a água potável consumida por ano no mundo vai para irrigação de campos agrícolas - tendo o efeito nefasto adicional de produzir uma grande porção de escorrência de rega que chega a rios e ribeiros, concentrando nestes, o excesso de nitratos de amónia que promovem a sua eutrofização³ [8]. Este efeito de arrasto de nitrogénio é reforçado pela crescente desflorestação que se faz sentir sobre solos florestais que são pressionados para crescente produção agrícola, e que ao serem desmatados e desflorestados se tornam mais vulneráveis fazendo com que o seu *top soil*, contendo nitratos, seja arrastado para os cursos de água [14].

¹ Plantas em hidroponia precisam de cerca de 1/10 da água necessária num meio com solo, porque neste último caso a maioria da água irrigada passa através do substrato do rizoma muito rapidamente sem ser absorvida [2].

² Neste caso a opção seria tomada considerando o excesso de humidade no ar em relação ao valor ótimo desejado.

³ Por sua vez, as soluções nutritivas aquosas em hidroponia tendem a possuir somente cerca de 25% da concentração em nutrientes essenciais que existe nos fertilizantes sólidos [2].

Todas estas questões encontram um nicho natural de potencial inexplorado nas atuais cidades do mundo urbanizado que são largamente incoerentes do ponto de vista da sua construção ecológica. A maioria das cidades falha em alcançar padrões mínimos de sustentabilidade e em sùmula, nenhuma cidade é capaz de viver dentro dos seus próprios meios de produção. Largamente, tudo o que é consumido na cidade é produzido fora da cidade, e pouco do que sai reentra. Perpetua-se assim um ecossistema urbano linear, em vez de circular, que pressiona continuamente na fonte as matérias-primas e retorna abismais quantidades de lixo produzido ao meio natural.⁴ Se a isto adicionarmos todos os biliões de euros que gastamos anualmente para nos tentarmos livrar deste material, temos uma imagem clara de uma crise ambiental [14].

Apesar de todas as proezas técnicas conseguidas pela nossa espécie, a maioria de nós continua sem a perceção do profundo e largamente negativo impacto que temos sobre o planeta. Assim é desejável que pensemos em construir cidades sustentáveis, desde agora, porque vai ajudar-nos a permitir que a Terra se regenere e recupere um balanço entre as nossas atividades e a dinâmica natural dos ecossistemas planetários dos quais dependemos.

Estudar e desenvolver unidades de produção hidropónica, como introdutoriamente fazemos neste trabalho, é um primeiro passo neste caminho de ajudar a normalizar o pensamento técnico de cariz ecológico no planeamento urbanístico e estrutural das cidades, ao fornecer-lhe uma outra uma opção tecnicamente viável para pensar a relação entre a produção agrícola e o consumo no meio urbano local.

1.1 Objetivos de estudo

Este trabalho procurou desenvolver um método de desenho e de abordagem analítica ao desempenho funcional de uma unidade de produção em hidroponia em ambiente controlado, que se demonstrasse exequível, capaz de produzir uma parametrização integral da estrutura da unidade de produção e no final da sua aplicação produzisse um quadro de simulações que incluísse os resultados da sua produtividade e consumos vários. Tal análise serviria para o estabelecimento de uma comparação alargada de desempenho entre a unidade de produção construída, e outros métodos de produção agrícola mais ou menos convencionais.

Para estabelecer esta comparação várias variáveis foram identificadas como parâmetros de comparação importantes. O conjunto destas variáveis de caracterização alargada do desempenho produtivo da unidade e seus consumos são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 1 – Parâmetros de avaliação de desempenho alargado das unidades de produção

$X_{produtividade}$	$X_{consumos}$	X_{custos}
$N^{\circ}_{plantas/colheita}$	$P_{elétrica\ total}$	$€_{elétrica\ total}$
$\rho_{produtividade/unidade/colheita}$	$V_{H_2O\ permanência}$	$€_{H_2O\ permanência/colheita}$
	$A_{superfície/unidade\ produção}$	$€_{carga\ nutritiva/colheita}$
	$M_{carga\ nutritiva/colheita}$	$€_{fitossanitários/colheita}$
	$M_{carga\ fitossanitária/colheita}$	

Somente alguns destes parâmetros de avaliação são caracterizados durante a execução deste documento, não se tendo caracterizado parâmetros cujas áreas de desempenho correspondentes estão ausentes do âmbito do trabalho. Parâmetros correspondentes à hidráulica dos escoamentos

⁴ Uma cidade média consegue produzir Gt de resíduos sólidos e biliões de litros de água residual todos os anos. [14]

e à estrutura funcional do circuito são caracterizados, todos os restantes são deferidos para posteriores estudos.

Alguns destes parâmetros requerem a definição da sua equação desenvolvida, que se apresenta em baixo. Começamos pelas potências instaladas,

$$P_{elétrica\ total} = P_{bombagem\ sol.} + P_{iluminação} + P_{climatização} + P_{renovação\ Ar} + P_{tratamento\ sol.} \quad (1)$$

$$P_{climatização} = P_{HVAC} + P_{Desumidificação} \quad (2)$$

$$P_{tratamento\ sol.} = P_{fitossanitária} + P_{oxigenação\ sol.} \quad (3)$$

Seguimos com os custos,

$$\epsilon_{elétrica\ total} = \epsilon_{bombagem\ sol.} + \epsilon_{iluminação} + \epsilon_{climatização} + \epsilon_{renovação\ Ar} + \epsilon_{tratamento\ sol.} \quad (4)$$

$$\epsilon_{climatização} = \epsilon_{HVAC} + \epsilon_{Desumidificação} \quad (5)$$

$$\epsilon_{tratamento\ sol.} = \epsilon_{fitossanitária} + \epsilon_{oxigenação\ sol.} \quad (6)$$

$$\epsilon_{H_2O_{permanência}/colheita} = V_{H_2O_{permanência}} \times N^{\circ}_{renovações\ H_2O/colheita} \times \epsilon_{unitário\ H_2O} \quad (7)$$

E terminamos com a produtividade da unidade de produção.

$$\rho_{produtividade/unidade/colheita} = \frac{N_{plantas\ produzidas/colheita}}{A_{ocupada/unidade\ de\ produção}} \quad (8)$$

Adicionalmente à comparação entre unidades de produção de diferentes métodos de produção agrícolas, o presente trabalho também procurou realçar relações analíticas tipicamente não exploradas na literatura sobre hidroponia, no que respeita especificamente às relações entre a estrutura funcional de um circuito de crescimento, o desempenho hidráulico do circuito e a sua produtividade fisiológica.

1.2 Motivação

Se conseguíssemos vislumbrar e comprovar a exequibilidade de uma tal metodologia genérica, viável para o desenho e para a análise funcional de uma unidade de produção em hidroponia em ambiente controlado, poderíamos então criar toda uma metodologia de desenho e análise, do início ao fim da estruturação integral da unidade genérica, que nos permitisse produzir um processo computacional de *input:output* preparado para simular o desempenho de uma qualquer unidade de produção, situada num qualquer ambiente climático e edificado, disponibilizando-nos no final da sua simulação, valores de consumo típicos, produtividades e custos, associados ao funcionamento da unidade. Estes valores permitiriam imediatamente um termo de comparação alargado com o funcionamento de outros métodos de produção agrícolas e a aferição da viabilidade de colocar a unidade hidropónica considerada, a produzir para um dado mercado-alvo. Uma aplicação deste género tem potencial académico, comercial e como ferramenta de planeamento institucional, ajudando desta forma a progredir a introdução credível de técnicas

hidropônicas no *mix* de soluções encaradas para soluções de agricultura em edificado, particularmente em agricultura urbana ou periurbana.

Por todo o contexto de valências e potencial a explorar que já foi introduzido para a aplicação de técnicas hidropônicas em meio urbano e periurbano é de aproveitar o interesse crescente em desenvolver estudos de projeto nesta área temática, tendo em vista o aproveitamento dos mercados-alvo que já estão atualmente disponíveis mas que se encontram ainda inexplorados. Desenvolver e otimizar de forma funcional as técnicas que consigam explorar este contexto de criação de riqueza para zonas urbanas e periurbanas pouco exploradas, indica da potencial viabilidade da aposta, e pode ser causa suficiente para atrair fundos públicos ou privados de I&D que queiram aprofundar a sua relação com o estudo e a implementação das técnicas de cultura vegetal sem solo.

1.3 Resumo da Metodologia

O trabalho almejou inicialmente o estudo integral de todo o processo de desenho e análise de uma tal unidade de produção, como seja, a construção dos circuitos de crescimento, a sua integração no meio físico interior da unidade de produção, a envolvente edificada da unidade de produção e a integração desta na envolvente ambiental exterior. Em resultado desta extensa dimensão do trabalho, foi-se tornando notório, à medida que progredíamos, que a temática em causa excedia largamente o enquadramento desta nossa dissertação de mestrado, e ficava além dos recursos em nossa posse para a desenvolver na íntegra. A solução para este sobredimensionamento surgiu da identificação de uma ordem de desenho simultaneamente necessária e desejável, para o bom funcionamento e para a boa simulação da estrutura da unidade de produção. Esta ordenação possível e desejável do desenho permitiu identificar áreas de caracterização prioritárias na construção da unidade e outras, por complemento, secundárias. Optou-se então por considerar para a discussão neste trabalho, somente as áreas cuja caracterização para a unidade de produção se consideraram prioritárias. As outras áreas foram parcialmente desenvolvidas ao longo do estudo realizado durante o desenrolar do nosso trabalho, com maior ou menor ênfase, mas não foram escolhidas para entrar no trabalho final, pelo critério de exclusão mencionado e que será posteriormente melhor desenvolvido.

Pode-se adiantar assim, que para todos os efeitos, este trabalho compreende o estudo detalhado da montagem da estrutura dos circuitos, pensada numa lógica relacional de objetos funcionais; no enquadramento da técnica de crescimento escolhida na estrutura funcional do circuito; e num estudo analítico do desempenho hidráulico/fisiológico da circulação da solução nutritiva ao longo de toda a estrutura funcional do circuito. Portanto, os aspetos relacionados com a integração do circuito na envolvente física interior, o edificado da unidade de produção, e a envolvente ambiental exterior, foram excluídos do documento final de estudo. Em maior detalhe a razão que justifica esta exclusão - e uma ordem de desenho, na qual, a estrutura funcional do circuito, a sua hidráulica e a solução nutritiva ganham em precedência à restante caracterização da unidade - é a de que, a correta constituição destes aspetos, domina largamente o bom funcionamento de uma unidade de produção. Ou, dito de outra maneira, é mais fácil encontrar unidades a operarem produtivamente quando tem uma boa hidráulica, solução nutritiva e estrutura funcional, ainda que estejam em ambientes climáticos e edificados, deficientemente dimensionados ou mal otimizados,⁵ do que encontrar a situação oposta, na qual um excelente dimensionamento do ambiente físico e do edificado, só por si são capazes de compensar uma deficiente qualidade hidráulica, de alimentação e estrutural. Inverter a ordem desta caracterização, seria incorrer num erro de pressuposto e incorrer no desperdício de recursos, relativamente ao dimensionamento operativo da unidade, e obviava o principal objetivo da mesma, ser capaz de sustentar os processos fisiológicos primários das plantas. Adicionalmente, uma outra razão que nos leva a dar precedência à apresentação destes aspetos no desenho e na análise do circuito, e a de que, a

⁵ Assumindo que não nos encontramos em intervalos climáticos proibitivos ao crescimento das plantas.

construção de uma unidade de produção é um processo colaborativo e hereditário, onde níveis anteriores de edição são necessários a níveis posteriores para este poderem ser adequadamente simulados e desenhados. Por exemplo, se não se definir uma estrutura de suporte para as plantas, não é possível determinar o número de plantas no circuito, nem a posição das plantas no espaço. Logo, não é possível determinar as superfícies de interseção de radiação das plantas, e respetivos sombreamentos, além de que não sabemos como cada circuito ocupa o volume no interior da unidade, e portanto, também não poderíamos, mesmo que quiséssemos, simular a distribuição de radiação solar sobre as superfícies das plantas, mesmo que tivéssemos o clima exterior e as características do edifício; o que em última análise nos permitiria fazer os cálculos relativos à iluminação interior complementar necessária para as plantas, aos valores de PAR absorvidos pelas plantas e às curvas de produtividade. Assim percebe-se do caráter hereditário e ordenado bem definido que deve guiar o desenho integral de um circuito.

Apresentamos de seguida a lógica de desenho ordenado que usamos para pensar a construção de uma unidade de produção em hidroponia.

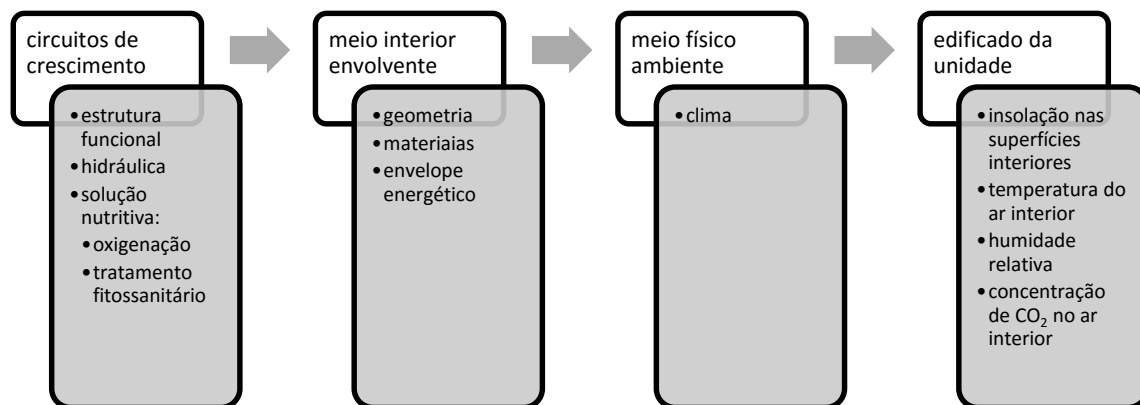


Figura 1 – Ordem lógica do desenho ordenado para pensar a construção de uma unidade de produção em hidroponia.

A caracterização dos circuitos de crescimento começa com um preâmbulo onde se discutem e justificam aspetos da sua conceção gráfica, esquemática, da sua montagem e classificação terminológica, desenvolvendo para um descritivo gráfico de cada circuito, que evolui do seu quadro genérico para o seu quadro de pormenor - zonas, elementos e peças. Seguidamente prossegue-se à descrição analítica da hidráulica dos escoamentos nos vários circuitos, apresentando os resultados de cada análise hidráulica aplicada e discutindo quais as suas implicações para a qualidade do respetivo desempenho operacional. O estudo do desempenho hidráulico dos circuitos de crescimento foi desenvolvido fazendo uso da mesma estrutura zonal de crescimento definida para o desenho dos circuitos. Sobre estes domínios de controlo de fluido, a que corresponde cada zona, aplicámos as equações de *Navier-Stokes*. Os domínios foram escolhidos por forma a facilitarem a leitura funcional do sistema e a sua análise hidráulica, e produzindo sempre que possível parâmetros de desempenho de leitura imediata. Sempre que se entendeu pertinente, indicou-se como proceder a melhorias na tomada de opções estruturais e na aplicação de análises funcionais no circuito.

A natureza do trabalho é toda ela, teórica, computacional e analítica, não se tendo considerado a execução de uma análise experimental para testar empiricamente nenhum parâmetro do circuito. Sempre que necessário fixaram-se os parâmetros de desenho dos circuitos fazendo uso de valores já caracterizados noutros estudos empíricos de circuitos e unidades hidropónicas, e no restante do circuito, fez-se recurso a métodos e programas de simulação e análise fundamental que descrevessem adequadamente o seu comportamento hidráulico.

A linguagem empregue em grande parte do trabalho primou sempre que possível pelo uso de um pensamento relacional dos parâmetros e componentes, vistos como objetos lógicos, dentro de um ambiente de programação. Isto teve como objetivo facilitar uma futura integração do estudo desenvolvido num ambiente de programação, observando o possível desenvolvimento futuro de um ambiente de simulação *user oriented* para produzir, num mesmo *software*, projetos de unidades de produção hidropónicas e as respetivas análises de desempenho, como os seus valores de consumo, produtividade e custos.

1.4 Contribuição científica do trabalho

Na sua ideia inicial, tal simulador seria um acrescento prototípico e inovador áquilo que é publicitado atualmente na programação de unidades hidropónicas em termos comerciais e de investigação, ajudando a enriquecer o panorama de estudo atual e lançando as bases, para após a necessária e adequada refinação e término do estudo aqui iniciado, se poder reproduzir um *software* de simulação, a disponibilizar a projetistas e investigadores, que ajudasse a avaliar a validade de se implementar uma dada unidade de produção num dado espaço geográfico e num dado espaço climático.

Tal como está, o trabalho permite identificar para efeitos da estrutura funcional e hidráulica, do circuito de crescimento, uma abordagem mista entre consulta empírica, construção lógica, e simulação e análise funcional, que permite chegar a relações entre o desempenho hidráulico, a construção estrutural e a produtividade fisiológica dos circuitos de crescimento. Estas relações apesar de saírem simplesmente da hidráulica fundamental e parametrização geométrica dos circuitos, apontam para uma abordagem analítica possível para a produtividade dos circuitos hidropónicos, em vez de reproduzir o típico estudo empírico para condições geométricas e hidráulicas pré-assumidas e fixadas. Neste sentido é um estudo que se distingue de uma boa parte da literatura pelo ângulo analítico detalhado segundo o qual considera a relação da produtividade fisiológica dos circuitos com a qualidade hidráulica dos seus escoamentos e da sua estrutura, e sugere que o mesmo poderá vir a ser reproduzido com sucesso para as restantes áreas de estudo da unidade de produção, segundo a ordem de desenho que foi adiantada.

1.5 Estrutura do trabalho

O corpo desenvolvido do trabalho está dividido em dois capítulos. O primeiro onde se introduzem variáveis de definição prévia, necessárias para a subsequente construção das relações estruturais, hidráulicas e fisiológicas dos circuitos de crescimento e que não se incluem diretamente no segundo capítulo, que respeita essencialmente ao desenvolvimento detalhado dos circuitos de crescimento e mencionadas relações. Nas variáveis de definição prévia incluem-se temas como, a espécie de planta tratada no estudo dos circuitos e as técnicas aplicadas nos circuitos de crescimento. No estudo das relações fisiológicas, estruturais e hidráulicas dos circuitos usam-se dois tópicos maiores: o estudo gráfico do circuito, onde se estabelecem as relações estruturais e funcionais usadas, bem como onde se enquadra a técnica a usar na estrutura do circuito, e, o estudo da hidráulica do circuito onde a estrutura previamente definida é analisada relativamente à qualidade dos seus escoamentos, e como estes afetam a produtividade fisiológica das plantas.

2. Contexto e revisão bibliográfica

2.1 Introdução e metodologias usadas em estudos sobre unidades hidropónicas

O propósito principal dos estudos de produtividade em hidroponia consultados visa o estudo da resposta produtiva de espécies vegetais selecionadas, em função da variação de variáveis de controlo do sistema ou do ambiente, com a fixação das restantes. Estes estudos, são maioritariamente, de carácter empírico e não preditivo. Alguns destes estudos de variação controlada das características do sistema e do ambiente procuram perceber comparativamente como se comportam sistemas hidropónicos estruturalmente distintos entre si, [4] [5] [6] [7] [8], outros, comparam entre si sistemas hidropónicos e outras técnicas mais convencionais [3].

A maioria dos estudos consultados fazem o controlo ativo de variáveis de sistema, como sejam a solução nutritiva, a estrutura funcional, a hidráulica dos escoamentos, ou a manutenção da colheita, fixando, ou controlando passivamente, através do uso de uma estufa, as variáveis do ambiente climático. A estufa, nestes casos, funciona como um envolvente energético edificado para a unidade, que possibilita a exposição do ambiente interior da unidade de produção, à variabilidade climática natural do meio envolvente - à medida que este transita pela estação de produção, e/ou entre estações, dependendo do período de tempo total do estudo - [3] [5] [6] [7] [8] [12]. Alguns destes estudos amenizam a sua exposição à variabilidade climática natural com opções de regulação do tipo *zero energy* para o edificado, como a regulação da intensidade da radiação ganha ou perdida pelo edifício através de vãos refletores ou cortinas termorefletoras, e sombreamentos [6] [7] [8].

Outro objetivo comum nestes estudos é a caracterização da resposta produtiva, da espécie vegetal no sistema hidropónico, à variação mista das variáveis ambientais e das variáveis do sistema. Novamente, a estufa funciona como um envolvente energético edificado para a unidade, que possibilita a exposição do ambiente interior da unidade de produção, à variabilidade climática natural do meio envolvente - à medida que este transita pela estação de produção, e/ou entre estações, dependendo do período de tempo total do estudo - mas desta feita, o clima interior é adicionalmente controlado, quer pelo ajuste da temperatura do ar interior [4][11][13] e da concentração de CO₂ [4][11], quer por aeração passiva e forçada do ar interior [1][11] ou regulação do ganho radiativo e da iluminação artificial [11].

Do conjunto de variáveis de ajuste do sistema estudadas destacamos, o estudo do meio de suporte das plantas [1][4][8], a composição da solução orgânica aplicada [1][5], a técnica de poda empregue durante o crescimento das plantas [3][6], a orientação das camas de crescimento (horizontal, vertical) [4], a temperatura da solução nutritiva [6][11][13], a composição em oxigénio da solução nutritiva [11], e o facto de o escoamento operar em circuito aberto ou fechado [8].

O conjunto dos estudos abrange uma variedade de espécies de plantas que vão desde as alfaces [1][11][12][13], pimentão-doce, pepino e aipo [1], passando pelas batatas [3], morangos [4][6], rúcula [5] ou tomate [7]. Os critérios em cada estudo para a escolha de espécie vegetal a estudar, são variados e consideram desde a espécie com maior potencial de retorno do investimento, às espécies que aglomeram mais informação produtiva à data do estudo, espécies culturalmente importantes para a atividade agrícola ou económica da região de estudo, espécies aclimatadas ao local de estudo, ou simplesmente, espécies mais resilientes e fáceis de reproduzir e crescer durante a experiência.

Em qualquer caso o conjunto de parâmetros de produtividade usados para traçar a resposta produtiva da planta é vasto, e considera diversos parâmetros, quase todos relacionados com a produção em massa de matéria seca ou fresca da colheita, mas nem todos. Disto são exemplos, a massa colhida por planta da colheita, o número de plantas por colheita, o número de frutos por colheita, a massa do fruto/tubérculo colhido, o número de frutos/tubérculos colhidos por planta por colheita, a largura ou comprimento do fruto/tubérculo/planta colhida [1][3][5][6][7]. Às vezes alguns destes parâmetros são apresentados como Massa Fresca Foliar (MFF) e Massa Seca Foliar

(MSF) e Área Foliar (AF) [4][11][12][13]. Noutros casos temos adicionalmente a estimação dos diâmetros longitudinais e transversais dos frutos, o teor dos sólidos solúveis totais do suco, a acidez total titulável do suco e o pH do suco [6].

Apesar de não ser comum vão-se produzindo mais estudos comparativos sobre a qualidade físico-química e organolética de plantas produzidas em sistemas sem solo, nos quais se inclui a hidroponia, em relação a plantas produzidas em outras técnicas mais convencionais, com solo. Estes estudos procuram promover a introdução das culturas sem solo no mercado atual, ao se identificarem de antemão os possíveis entraves ou nichos a explorar no que respeita à potencial opinião e adoção destas culturas por parte do consumidor. A este respeito aponta-se um estudo de revisão [10], que abre boas perspectivas para a qualidade das plantas germinadas e crescidas em culturas sem solo.

A maioria dos estudos consultados são desenvolvidos em volume de produção e espaço ocupado doméstico ou de pequena-escala, [1] [3] [4] [13]. Alguns outros expandem para um volume de produção em média escala [6] e grande escala [11]. Em nenhum dos estudos consultados as unidades de produção exploram circuitos hidropónicos com múltiplas cotas de produção sobrepostas na dimensão vertical, logo, todos os resultados obtidos simplificam para o caso de uma superfície única a interagir com as restantes variáveis ambientais e de sistema.

Do conjunto dos estudos consultados retiram-se algumas noções e conclusões importantes de reter para futuros novos estudos sobre unidades de produção em hidroponia, nomeadamente o potencial de melhorar significativamente a resposta produtiva das plantas se houver ajustes nos microclimas interiores à unidade, procurando os *optimal intervals/setpoints* de temperatura do ar interior, humidade do ar interior, concentração de CO₂ e/ou iluminação [1] [4] [8] [11], e o potencial para melhorar a resposta produtiva das plantas se houver ajustes nas variáveis do sistema, nomeadamente no meio de suporte das plantas [1][4][8], na temperatura da solução junto do rizoma [6][8][11][13], no método de poda durante o crescimento das plantas [3] [7] , na qualidade da solução nutritiva [5], na circularidade do circuito [8] e na concentração de oxigénio na solução nutritiva, especialmente junto do rizoma das plantas [11]. Espécies semi-temperadas, e.g. as alfaces, vêm o seu crescimento fortemente inibido se forem expostas a altas temperaturas, e.g. Verão em região temperada. Nestes casos o potencial para melhorar a resposta produtiva ao longo da estação quente, é especialmente melhorado, ao se explorar a regulação climática de temperaturas e humidades do ar interior da unidade [1].

Para além de identificarem empiricamente a resposta produtiva das plantas, de uma dada espécie, a um conjunto alargado de variáveis de ambiente e de sistema - o que permite caracterizar a paisagem ideal de desenho a aplicar ao ambiente da unidade de produção - alguns estudos procuram adicionalmente criar modelos preditivos do comportamento produtivo da planta em resposta a variáveis de produção ambientais ou de sistema. Estes modelos baseiam-se novamente em empirismo mas expandem para a possibilidade de serem aplicados genericamente em qualquer circunstância onde as condições do meio sejam semelhantes às estudadas e tomam como variáveis independentes, os úteis valores, da radiação incidente nas folhosas ou a temperatura nas folhosas [11] [12].

Idealmente seria preferível que se desenvolvessem modelos fisiológicos determinísticos, cuja fisiologia produtiva base estivesse comprovada empiricamente por estudos, mas tais modelos não foram encontrados na literatura consultada.

3. Metodologia do estudo

3.1 Introdução ao ambiente e ao método: definição prévia das variáveis

Espécie estudada

A espécie selecionada a estudo para o presente trabalho foi a *lactuca sativa*, nome comum, a alface. A razão desta escolha prende-se com o facto do corpo de estudo fisiológico e produtivo sobre esta espécie ser vasto, em comparação com outras espécies. Igualmente é uma espécie culturalmente importante como hortícola nos climas temperados e semi-temperados, quer no consumo, quer na produção agrícola. Adicionalmente, o seu elevado volume como espécie privilegiada no consumo pode garantir a rentabilidade e o retorno mais rápido do investimento que seja feito na sua unidade de produção e desta forma o seu estudo suscita interesse como cultura de arranque para a rentabilização de uma dada unidade de produção esboçada. Na prática a sua descrição fisiológica não é necessária para o corrente trabalho, exceção feita à identificação de um diâmetro máximo típico para sua cabeça crescida, que se tomou como de 30cm, necessário ao desenho do espaçamento entre suportes de crescimento, e logo, necessário para a determinação do número de plantas suportadas por cada cama de crescimento e circuito.

Técnicas estudadas

As técnicas hidropónicas aplicadas a estudo foram a NFT e a DFH. A técnica DFH foi desenvolvida de forma independente em 1976 por Collins Jensen em 1985 no Arizona e por Massantini em 1976 em Itália. Esta técnica pressupõe uma cama flutuante de suporte onde as plantas ficam suportadas, enquanto as suas raízes mergulham livremente num tanque de solução nutritiva e parte fica exposta à atmosfera ambiente [9].

O tanque deve ser recirculado e arejado, bem como monitorizado para a sua qualidade fitossanitária e nutricional. O arejamento é vital nesta técnica, porque é fácil a solução criar zonas mortas senão houver mistura da solução. Arejadores de bolha podem ser usados para oxigenar a água, ou alternativamente bombas com injeção de ar. Nesta técnica, a solução do tanque deve ficar em escuridão total como forma de evitar o desenvolvimento de micro-algas e algas que competem por nutrientes [2].

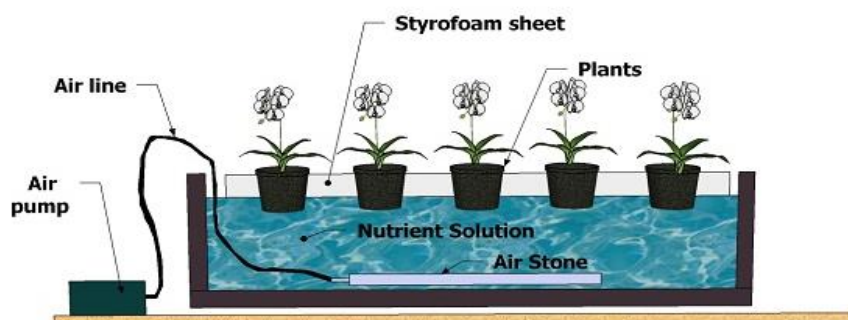


Figura 2 - Esquema diagramático do perfil de um circuito com técnica hidropónica DFH (fonte: <http://www.medicalmarijuanaadvisor.net/>, 2015).

A técnica NFT foi desenvolvida no final dos anos 60, por Allan Cooper em Inglaterra. Neste sistema, a solução nutritiva é bombeada até à ponta mais alta de cada canal de crescimento, e a partir daí cai por gravidade através dos rizomas das plantas, até chegar a uma calha de coleta na outra ponta. Nesta técnica cerca de 2/3 do rizoma encontra-se submerso na solução [6].

Os canais são construídos tipicamente de plástico ou madeira e são alinhados com polietileno. Uma bomba é usada para circular a solução através dos canais. As plantas estão suspensas sob a água com as raízes a cair para dentro da solução e os canais são ligeiramente inclinados, sendo a água recolhida e reutilizada após cada utilização. A solução é monitorizada para o reforço da carga de sais e para tratamento antes de ser recirculada [2].

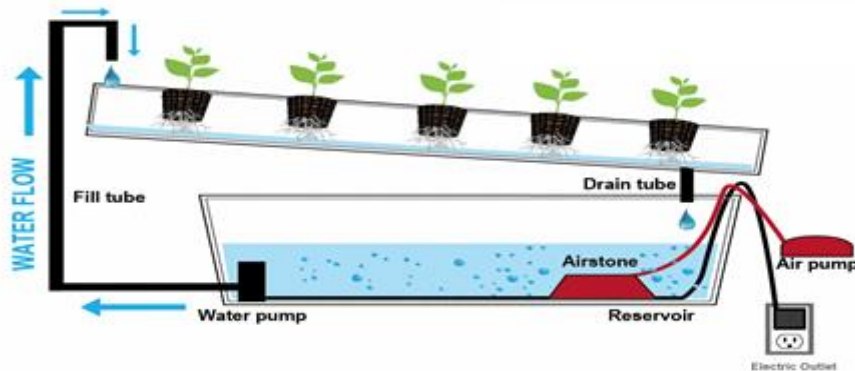


Figura 3 – Esquema diagramático do perfil de um circuito com técnica hidropónica NFT (fonte: <https://hydroponicsinformation.wordpress.com/2013/04/21/nfthydroponics/>, 2015)

As raízes tendem a crescer até formarem uma matriz entremeadada de rizomas. É um sistema que requer por comparação com outros, um volume de água em permanência muito menor. É assim muito mais fácil aquecer a solução em meses frios ou arrefecer-la em meses quentes, para melhorar a resposta produtiva da planta. É igualmente mais fácil aplicar tratamentos e recarregar de sais [6] [7].

3.1.1 Caraterização do ambiente interior

O que se define como estudo de interior da unidade de produção e crescimento de plantas, é o *i)* estudo dos seus circuitos de crescimento, e, *ii)* o estudo das condições físicas locais que concernem ao seu ambiente interno. Como já discutido anteriormente somente estudámos neste trabalho o ponto respetivo aos circuitos de crescimento.

3.1.2.1 Caraterização dos circuitos de crescimento - *do seu desenho gráfico, da sua montagem conceptual e da sua análise funcional e de desempenho*

A caraterização dos circuitos de crescimento começa com um preâmbulo onde se discute e justificam aspetos da sua conceção gráfica, esquemática, da sua montagem e classificação terminológica, desenvolvendo para um descritivo gráfico de cada circuito, que evolui do seu quadro genérico para o seu quadro de pormenor - zonas, elementos e peças. Seguidamente prossegue-se à descrição analítica da hidráulica dos escoamentos nos vários circuitos, apresentando os resultados de cada análise hidráulica aplicada e discutindo quais as suas implicações para a qualidade do respetivo desempenho operacional; termina-se com a caracterização da solução nutritiva re-circulante, incidindo sobre aspetos como, a água base, a constituição em carga nutritiva e respetiva recarga, a monitorização físico-química em pH, EC, [iões] da composição da solução, a temperatura da solução, a concentração de carga em oxigénio dissolvido, e o processo de tratamento microbiológico desejado para a solução e para o circuito.

Sempre que se entendeu pertinente, indicou-se de como proceder a melhorias na tomada de opções estruturais e na aplicação de análises funcionais no circuito.

Estudo Gráfico

Os circuitos de crescimento são sistemas físicos tanto melhor compreendidos quanto forem pensados como estruturas-operadas-por-zonas que suportam o crescimento de plantas-germinadas-pós-amadurecidas em camas-hidropônicas-de-crescimento distribuídas-por-produção-vertical e integradas no meio físico local envolvente.

Ordenou-se sequencialmente o desenho de qualquer um dos circuitos estudados por três **níveis de estrutura**: um primeiro nível reservado para a construção da **estrutura de zonas de escoamento**; um segundo nível reservado para construção da **estrutura de campos de desempenho**; um terceiro nível reservado para a construção da **estrutura de alimentação de solução** ao circuito; e um quarto nível reservado para a construção da **estrutura de peças**.

Cada um destes níveis de estrutura resulta da aplicação de um mesmo conjunto de regras genéricas relativas à parametrização de circuitos que constituem aquilo a que chamamos de **desenho de um circuito por adição de níveis de estrutura**:

- Cada nível de estrutura é uma caracterização quantitativa e qualitativa adequada de um domínio bem definido de parâmetros do circuito, ao qual, mediante a atribuição correta de valores, conseguimos descrever parcial ou totalmente a sua estrutura e o seu funcionamento;
- Cada nível de estrutura de um circuito opera sobre um universo diverso e próprio de **parâmetros de ajuste de estrutura** corretamente identificados e tipologicamente adequados à descrição do nível de estrutura a ser tratado. Cada um destes universos de parâmetros é chamado de **universo de parametrização** do nível;
- Nenhum universo de parametrização de nenhum dos níveis de estrutura estudados foi perfeitamente caracterizado ou foi definido na íntegra para todos os seus parâmetros de ajuste de estrutura. Todos os universos estudados ficaram só parcialmente definidos e caracterizados, sem que percebamos o alcance total dos mesmos - o que sai fora do âmbito e interesse deste trabalho;
- Posto isto, os conjuntos efetivos de parâmetros sobre os quais cada nível de estrutura operou são mais corretamente descritos como domínios parciais de parametrização, i.e. **subdomínios de parametrização**, do que por universos de parametrização;
- O número de subdomínios de parametrização que se empregam para a caracterização de cada um dos níveis de estrutura pode ser sujeito a variações de nível para nível, mediante o que se entender adequado. O seu número deve respeitar no entanto a condição de existir pelo menos um subdomínio por nível;
- Cada um subdomínio de parametrização que hajamos definido e empregue no nosso trabalho (independentemente do nível de estrutura a que corresponda), foi sempre desenvolvido na forma de uma estrutura matricial, a que genericamente chamámos de **matriz de parametrização**. Existe assim uma relação de univocidade entre todos e cada subdomínio de parametrização e a sua matriz de parametrização respetiva. Naturalmente a constituição em tipo e número de parâmetros de cada uma destas matrizes de parametrização pode variar de subdomínio para subdomínio em função dos parâmetros que compõe o subdomínio, e adicionalmente, a estrutura da matriz pode sofrer ajustes

próprios relativos a uma melhor organização lógica da informação na sua estrutura tal que possibilite uma maior facilidade de leitura e/ou de atribuição aos seus parâmetros;

- O número das matrizes/subdomínios de parametrização definidos para um dado nível de estrutura é chamado da **cardinalidade de matrizes/subdomínios** do nível;
- Cada nível de estrutura fica suficientemente caracterizado somente quando todas as suas matrizes de parametrização estiverem completa e corretamente atribuídas de valores adequados ao conjunto de todos os seus parâmetros;
- Qualquer conjunto de valores que esteja atribuído a uma matriz de parametrização só é válido se garantir estar de acordo com todas as regras de integridade e dependência válidas que estejam definidas para os parâmetros dessa matriz. Qualquer atribuição de valores que cumpra com estas condições é em si mesma uma atribuição válida para a matriz. Uma matriz pode dispor de várias destas possibilidades de atribuição (válidas) para o conjunto dos seus parâmetros, mas só pode efetivamente tomar/assumir uma destas atribuições para os seus valores. Ao dispor de várias possibilidades na atribuição, dizemos que a matriz prevê, **variabilidade na atribuição** (valor **I**). Segue por corolário, de que se temos *variabilidade na atribuição* junto das matrizes de um circuito, temos por legado, *variabilidade na atribuição* junto às estruturas de nível que lhes correspondem e na estrutura do circuito como um todo;
- Que um nível de estrutura preveja *variabilidade na atribuição* aos seus parâmetros, não garante de que este faça uso efetivo da mesma em aplicação ao seu desenho. No entanto, em caso de aplicação desta variabilidade em atribuição ao seu desenho, um nível consegue produzir aquilo a que podemos de chamar de (por virtude da unicidade vigente para entre quaisquer parâmetros do seu ajuste de estrutura e a sua atribuição respetiva), estruturas de nível com parametrização homóloga e atribuição distinta, cuja natureza atributiva divergente indica da divergência da sua estrutura em relação à estrutura dos seus níveis parentes. A caracterização desta divergência, avançamos, fica corretamente produzida, aquando da sua avaliação em termos de uma distância qualitativa. A distância entre estas estruturas de nível homólogas, produzidas da forma que foi exposta, deve-se avaliar nos termos de, **um circuito**, ou, **menos de um circuito**. Um circuito, implica divergência na estrutura relativamente ao modelo (divergência do **tipo M**), e menos de um circuito, implica divergência na estrutura relativamente à versão (do **tipo V**);
- Estruturas de nível homólogas que distem de um circuito na sua atribuição, caem em linhas de desenho que pertencem a circuitos diferentes. Estruturas de nível homólogas que distem de menos de um circuito na atribuição, caem em linhas de desenho próximas, que podem estar incluídas dentro do mesmo circuito - são identificadas como ramificações, ou, versões de um mesmo circuito. No entanto para que tal aconteça, o conjunto da linha de desenho a que pertence, em qualquer um dos seus níveis, tem de garantir a distância de atribuição ser inferior a um circuito em relação ao restante das linhas de desenho que pertençam ao seu/mesmo circuito;

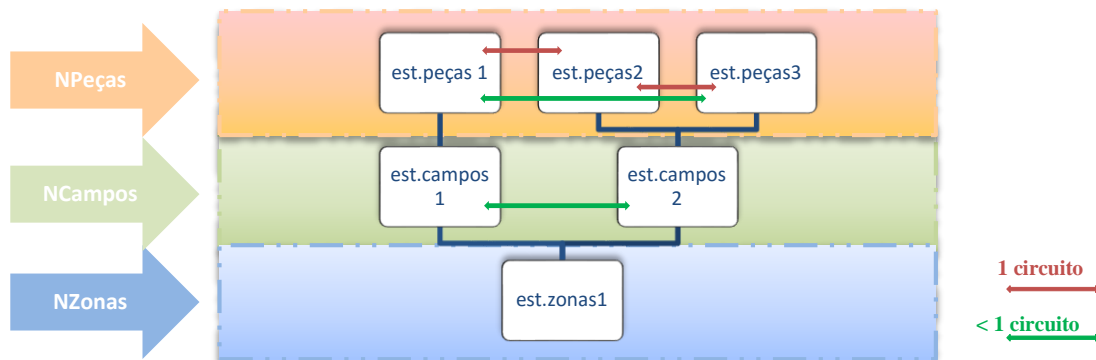


Figura 4 - Corte de camada de uma árvore de desenho produzida para circuito(s) genérico(s) desenvolvido(s) por adição de níveis de estrutura. Vista antes da diferenciação das estruturas por circuito correspondente.

- Por exemplo, no caso dos desenhos em cima, temos várias linhas de desenho com diferentes relações de atribuição entre si, em termos de distâncias de atribuição –as linhas (z1,c1,p1), (z1,c2,p2) e (z1,c2,p3); Se refizermos agora as linhas de desenho tendo em consideração os seus agrupamentos pelos circuitos válidos respetivos, ficamos com as seguintes distribuições:

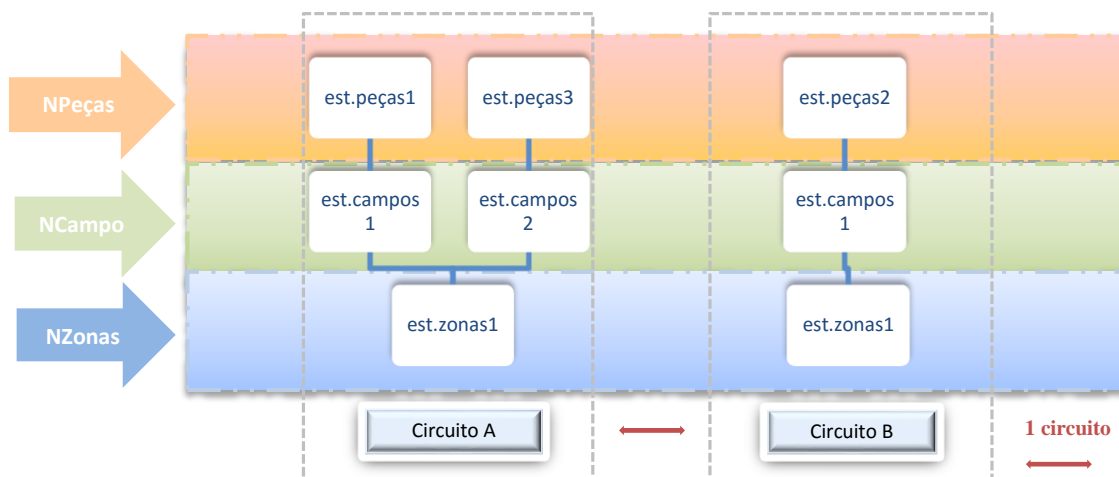


Figura 5 - Corte de camada de duas árvores de desenho produzidas para dois circuitos genéricos desenvolvidos por adição de níveis de estrutura. Vista após diferenciação das estruturas por circuito

Neste caso temos dois circuitos, o A e o B. O primeiro tem duas linhas de desenho que divergem como *versões* de um mesmo circuito, ao nível da *estrutura de campos* e da *estrutura de peças*. O segundo tem uma linha única de desenho. Os circuitos divergem *entre si*, naturalmente, à distância de um circuito.

As noções de homologia, diferenciação na atribuição, distância na atribuição e constituição de circuitos e linhas de desenho respetivas, são importantes para se compreender o mecanismo de classificações aplicado aos nossos circuitos / e as sequências de desenho estrutural adoptadas/seguidas.

- A posição de aplicação de um qualquer nível de estrutura (desenvolvido) ao desenho ordenado de um circuito é determinada pelo desenhador em função da abordagem

metodológica que este considerar como a mais adequada para o desenvolvimento do seu *desenho*;

- A posição de aplicação de um qualquer nível de estrutura (desenvolvido) ao desenho ordenado de um circuito é determinada pelo desenhador em função da abordagem metodológica que este considerar como a mais adequada para o desenvolvimento do seu *desenho*;
- Níveis de estrutura que ocupem a mesma posição na ordem de aplicação ao desenho do circuito podem intercambiar o momento da aplicação entre si, mas devem respeitar a ordem geral à qual estão indexados;
- Os níveis de estrutura desenvolvidos adicionam-se progressivamente ao desenho de um circuito produzindo caracterizações mais ricas e informações mais completas sobre a sua estrutura e a sua operação;
- A estrutura final de um circuito é a expressão simultânea de todos os níveis de estrutura que foram desenvolvidos e aplicados ao desenho do circuito;
- Seja qual for a ordem efetiva de aplicação de níveis de estrutura ao desenho de estrutura de um circuito, sempre que existam conflitos na validade da atribuição de valores entre quaisquer parâmetros de estrutura do circuito, irreferente à linha de desenho ao qual pertençam, dizemos que a linha de desenho não tem atribuição válida no seu conjunto, até que se resolva adequadamente o conflito;
- Para evitar conflitos de atribuição, na atribuição de valores aos parâmetros de uma qualquer linha de desenho, de qualquer circuito, devemos de observar o cumprimento de todas as regras de integridade que estejam definidas para atribuição aos níveis de estrutura desse circuito. Isto implica o cumprimento de todas as regras locais de condicionalidade, i.e. definidas *intrinsecamente* para cada estrutura, e de todas as regras de **condicionalidade herdada**, i.e. que são impostas na atribuição a uma dada estrutura, de tal forma que a *validade na atribuição* a esta estrutura não entre em conflito com a *validade na atribuição* de qualquer uma das outras estruturas que lhe tenham sido previamente definidas durante o desenho do circuito. São estas últimas, (regras), que permitem a *progressividade válida na atribuição de parâmetros ao longo de uma linha de desenho* de um circuito;
- Os *níveis de estrutura* são sempre afetados de *condicionalidade intrínseca* na atribuição a qualquer das suas estruturas locais de parametrização produzidas. As relações de *condicionalidade intrínseca* servem para garantir *integridade estrutural e funcional* nas estruturas de parametrização produzidas. A integridade estrutural e funcional requerida para o produto de qualquer matriz de parametrização é definida sempre que necessário, e apresentada no capítulo correspondente à descrição da matriz de parametrização respetiva;
- Os *níveis de estrutura* vem identificados da existência ou não de *condicionalidade herdada* nas suas estruturas de nível, i.e. subdomínios de parametrização \Leftrightarrow matrizes de parametrização, identificando quais as relações de dependência que existem entre elas. A natureza particular das *condicionalidades herdadas* estabelecidas entre as estruturas são descritas nas tabelas que resumem e descrevem as matrizes de parametrização herdeiras;

Em resumo, **as estruturas de zonas, campos, alimentação e peças** de um dado circuito são unidades de parametrização de tipologia própria, com os seus domínios de parametrização e momentos de aplicação bem definidos, que ao serem atribuídas de valores adequados nos seus parâmetros-de-ajuste-de-estrutura produzem caracterizações válidas e suficientes, da natureza funcional e estrutural do circuito. E o **desenho de um circuito por adição de níveis de estrutura** é o simples reconhecimento de que se agruparmos certos parâmetros da caracterização de um circuito por conjuntos próprios e bem definidos, e os aplicarmos em momentos próprios, bem definidos, garantimos a existência de um grau elevado de clareza informativa durante a leitura oportuna do nosso circuito, uma que de outra forma nos poderia permanecer oculta, induzindo a erros de montagem por turbidez estrutural, que se iriam somando com o progredir do desenho, e tornariam as correcções mais difíceis de identificar e mais pesadas e complexas de executar. A informação agregada por temas e o desenho executado por fases, permite-nos limitar o alcance estrutural das nossas decisões, facilitando a tomada em antecipação de decisões informadas sobre as características desejadas para o nossos circuitos e em resultado permite-nos desenvolver com maior correcção os desenhos, i.e. os circuitos, que pretendemos.

Apresentamos na tabela seguinte um quadro-resumo das características dos níveis de estrutura que foram desenvolvidos e aplicados ao desenho dos circuitos do nosso trabalho, por *adição de níveis de estrutura*.

Tabela 2 - Quadro-resumo das características genéricas dos níveis de estrutura produzidos para o nosso trabalho

Nível de estrutura	(#N) posição de aplicação do nível	Cardinalidade de subdomínios/matriz de parametrização usados	Matriz de parametrização	Objeto lógico	[Variabilidade/Distância/Divergência]	Dimensão [linhas x colunas]	Nº de parâmetros de ajuste
(1) nível de estrutura de zonas	1	1	vetor de zonas	Vetor lista	I/1/M	[1x6]	6
(2) nível de estrutura de campos	2	1	matriz de campos de desempenho	Matriz de listas	I/1/M	[5x6]	21
(3) nível de estrutura de alimentação	3	1	vetor de alimentação	Vetor lista	I/<1/V	[1x7]	7
(4) nível de estrutura de peças	4	1	matriz de peças	Matriz de listas	I/ < 1/V		--

O **nível de estrutura de zonas** desenvolve o essencial da *coesão estrutural dos circuitos e da dinâmica global dos seus escoamentos*. O **nível de estrutura de campos** define-lhes o essencial do *preenchimento da estrutura e das suas orientações gerais de desempenho*. O **nível de**

estrutura de peças arremata o preenchimento estrutural dos circuitos e detalha em pequena escala as *características de aparelhagem dos elementos do circuito*.⁶

(1) Nível de Estrutura de Zonas

O *nível de estrutura de zonas* é o primeiro nível a ser aplicado ao desenho ordenado de um circuito e produz a(s) sua(s) *estruturas de zona*, é descrito por um subdomínio de parametrização, da forma matricial vector-lista, dimensão [1x7], que vem atribuído de sete parâmetros de ajuste-de-estrutura, e que dá pelo nome de *vetor de zonas*. Prevê variabilidade na atribuição, divergência do tipo M e condicionalidade intrínseca.

$$S_{1,1} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\} \quad (9)$$

$$\begin{array}{lll} x_1 = \text{depósitos}_{/natureza} & x_4 = \text{coleção}_{/homologia} & x_7 = \text{fachada}_{/coleção/alcance} \\ x_2 = \text{depósitos}_{/alinhamento} & x_5 = \text{andares}_{/tipo\ escoamento} & \\ x_3 = \text{alimentação}_{/homologia} & x_6 = \text{fachada}_{/coleção} & \end{array}$$

O *vetor de zonas* resulta da aplicação do operador *matriz de parametrização* sobre o *subdomínio de parametrização* definido para o *nível de estrutura de zonas*.

$$[\text{Vetor de Zonas}]: \text{Matriz}_{\text{parametrização}}(S_{1,1}) \quad (10)$$

O *vetor de zonas* produz *estruturas de zona*, viáveis e plenamente definidas, para o/no desenho do circuito⁷.

Descreve-se cada um dos parâmetros do *vetor de zonas* na tabela seguinte.

⁶ Refere-se que uma peça que venha implicada num parâmetro da estrutura de campos pode no entanto merecer destaque como peça no nível de estrutura de peças. O oposto também pode ocorrer, peças que não vem caracterizadas na estrutura de campos mas somente na estrutura de peças. E também peças que podem ser caracterizadas somente na estrutura de campos e não detalhadas na estrutura de peças. Cabe ao desenhador em função da metodologia de desenho que quer aplicar ao desenho das estruturas e das árvores de desenho que quer produzir, determinar as melhores combinações a aplicar ao circuito.

⁷ I.e. Fica plenamente definido **quais** são as zonas que tomam parte na *estrutura de zonas* e por extensão **quantas** são.

Tabela 3 - Quadro-resumo dos *parâmetros de zona* constituintes dos *vetores de zona*.⁸

	Parâmetro	Atributo /tipo/dimensão/unidade	Obs.
Zona1/Zona3/Zona4	○ depósitos _{/natureza}	<ul style="list-style-type: none"> • independentes.com/string,discreta/--/-- • único_simples/string,discreta/--/-- • único_tanque/string,discreta/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> define se o circuito possui depósitos independentes, um para a alimentação e outro para a colecção de solução, comunicando escoamento entre si no sentido colecção→alimentação, ou, se possui um único depósito para ambas as tarefas, colocado, ou numa das faces do circuito, ou disposto ao longo de todo o comprimento da base.
	○ depósitos _{/alinhamento}	<ul style="list-style-type: none"> • simétricos/string,discreta/--/-- • assimétricos/string,discreta/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> só existe para depósitos independentes. Define se os depósitos são simétricos em relação ao eixo médio que divide o comprimento do circuito, neste caso há um circuito de cada lado do eixo, ou, se os depósitos são assimétricos e estão ambos do mesmo lado do eixo.
Zona2	○ alimentação _{/homologia}	<ul style="list-style-type: none"> • alinhada_(simétricos)/string,discreta/--/-- • cruzada_(assimétricos)/string,discreta/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> define se faces e depósitos de alimentação se encontram em lados diferentes do eixo médio de simetria horizontal (<i>assimétricos</i>), ou se encontram do mesmo lado (<i>simétricos</i>). Os termos <i>alinhada</i> e <i>cruzada</i> podem ser usados como alternativa para não se confundirem com os valores do <i>parâmetro depósitos_alinhamento</i> . No <i>vetor de zonas</i> , a homologia da alimentação vem atribuída primeiro. Para depósitos <i>único_tanque</i> a homologia é <i>alinhada</i> , por defeito, tanto na alimentação como na colecção.

⁸ Referimos que os *parâmetros* identificados na tabela3 são *parâmetros* adequados para o tipo de circuitos que estudámos neste trabalho. Não se garante nem se avança de nenhuma forma que sejam de aplicação válida para a construção de circuitos assentes noutras condições de desenho. Sugere-se que em qualquer caso haja uma avaliação da sua adequabilidade à construção das estruturas pretendidas.

	○ <i>colecção</i> / <i>homologia</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>alinhada</i>_(simétricos)/<i>string,discreta</i>/--/-- • <i>cruzada</i>_(assimétricos)/<i>string,discreta</i>/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> define se faces e depósitos de colecção se encontram em lados diferentes do eixo médio de simetria horizontal (<i>assimétricos</i>) do circuito, ou se se encontram do mesmo lado (<i>simétricos</i>). Os termos <i>alinhada</i> e <i>cruzada</i> podem ser usados como alternativa para não se confundirem com os valores do <i>parâmetro depósitos_alinhamento</i> . No <i>vetor de zonas</i> , a homologia da alimentação vem atribuída primeiro. Para depósitos <i>único_tanque</i> a homologia é <i>alinhada</i> , por defeito, tanto na alimentação como na colecção.
	○ <i>andares</i> / <i>tipo escoamento</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>paralelo</i>/<i>string,discreta</i>/--/-- • <i>série</i>/<i>string,discreta</i>/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> define se o escoamento entre andares/níveis/cotas de produção na zona2 se realiza em <i>série</i> ou em <i>paralelo</i> .
Zona3	○ <i>fachada</i> / <i>colecção</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>I</i>/<i>lógico,discreto</i>/--/-- • \emptyset/<i>lógico,discreto</i>/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> identifica se existe fachada de colecção na zona3, logo zona3.
	○ <i>fachada</i> / <i>colecção</i> / <i>alcance</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>local</i>/<i>string,discreta</i>/--/-- • <i>transversal</i>/<i>string,discreta</i>/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> identifica se o alcance de operação da fachada de colecção no circuito é local ou transversal. De outra forma, se o depósito que recebe a colecção de água, está do lado da face de colecção ou no lado oposto. No caso de não existir fachada de colecção o valor por defeito deste <i>parâmetro</i> é NULL.

Note-se que o *vetor de zonas* é a primeira estrutura de parametrização a ser aplicada no desenho do circuito e por isso, apesar de vir sujeita de *condicionalidade intrínseca*, não possui *condicionalidade herdada*, isto porque não há estruturas com ordem de aplicação anterior, que possam definir condições de atribuição de carácter transferível entre estruturas. Cada parâmetro de ajuste descrito na tabela2 identifica nos seus comentários as regras de condicionalidade intrínseca a que vem sujeito. Note-se também que a atribuição ao *vetor de zonas* prevê *variabilidade na atribuição*, o que possibilita a construção vária de *estruturas de zonas (de escoamento)* para o circuito - sendo em número idênticas à cardinalidade das atribuições. Cada uma destas estruturas, divergentes ao nível do circuito, i.e. do tipo M, vem descritas nas tabelas 4 a 7, acompanhadas da respetiva atribuição matricial paramétrica e do diagrama esquemático de estrutura correspondente.

As estruturas de zonas (de escoamento) são composições conceptuais, geométricas-alfa-numéricas, que desenvolvem o essencial da coesão estrutural dos circuitos e da dinâmica global

dos seus escoamentos. São compostas por um número definido de *zonas de escoamento*, com objetos e elementos de zona, *regras de integridade* e *modos de atividade*. As **zonas de escoamento** são em essência volumes tridimensionais de controlo localmente atribuídos, incluídos dos elementos e objetos de zona funcionalmente apropriados e caracterizadas pelos adequados parâmetros estruturais e de desempenho. Há quatro zonas de escoamento desenvolvidas neste trabalho, (disponíveis) para a caracterização das *estruturas de zona* produzidas. Dão pelos nomes de Zona de Alimentação, Zona de Crescimento, Zona de Coleção e Zona de Realimentação e seguem descritas como na tabela 3.

Tabela 4 - Quadro descritivo das zonas disponíveis para caracterização das estruturas de zona produzidas.⁹

	Descrição	Elementos na zona	Objetos na zona
1.Zona de Alimentação <i>[Intrínseca]</i>	<ul style="list-style-type: none"> Bombagem de água desde o depósito de alimentação até à entrada das calhas de crescimento através de uma rede de mangueiras e distribuidores de caudal 	<ul style="list-style-type: none"> fachada de alimentação 	(i) bombas, condutores, distribuidores, divisores, depósito
2.Zona de Crescimento <i>[Intrínseca]</i>	<ul style="list-style-type: none"> Constituída pelos vários andares e canais de escoamento que suportam o crescimento das plantas. Zona onde a solução nutritiva entra em contacto com o rizoma das plantas. 	<ul style="list-style-type: none"> bancada de crescimento (cotas/níveis de produção) 	(i) condutores
3.Zona de Coleção <i>[Acessória]</i>	<ul style="list-style-type: none"> Colecção da água que sai da zona 2 e condução através de calhas e tinas até à entrada do depósito de recolha. 	<ul style="list-style-type: none"> fachada de colecção 	(i) condutores, coletores, depósito,
4.Zona de Realimentação <i>[Acessória]</i>	<ul style="list-style-type: none"> Bombagem de água do depósito de recolha para o depósito de alimentação, através de uma rede de mangueiras ou outro meio de escoamento. 	<ul style="list-style-type: none"> realimentação 	(i) condutores

Adicionalmente ao uso de zonas de escoamento, uma *estrutura de zonas*, usa das suas **regras de integridade** para fazer progresso da sua caracterização, definindo condições de coesão estrutural (ce), condições de tipologia de circuito (tc) e condições de dinâmica dos escoamentos(de), que deve de cumprir sob pena de não ser válida, que garantem a sua correta *coesão estrutural* e a correta *dinâmica global dos seus escoamentos*. As regras de integridade determinam igualmente

⁹ Apesar de cada objeto na estrutura de zonas ser definido para unicamente uma das zonas, durante o funcionamento do circuito ele pode tomar parte na operação de zonas sobrepostas distintas.

da prescindibilidade/imprescindibilidade da atribuição de cada zona à *estrutura de zonas* do circuito. Certas zonas são de atribuição imprescindível, e se não estiverem presentes, a estrutura de zonas produzida falha em satisfazer as regras de integridade necessárias. Estas zonas chamam-se de *intrínsecas*. Certas zonas são prescindíveis e a sua atribuição, pese acrescentar diversidade estrutural ao circuito, não é necessária para garantir o cumprimento das necessárias regras de integridade. Estas zonas chamam-se de *acessórias*.

Cabe agora, oportunamente, desenvolver as **regras de integridade** de que falamos, em lista inferior:

- (ce) Qualquer zona do circuito é contígua, a pelo menos, uma das outras zonas do circuito, partilhando entre elas uma das faces;
- (ce) Cada zona possui sempre uma entrada e uma saída de fluxo, distintamente posicionadas na sua superfície de controlo, e a operarem em simultâneo;
- (de) A estrutura de zonas de um circuito deve garantir sempre a alimentação do rizoma das plantas;¹⁰
- (de) A estrutura de zonas do circuito deve garantir a re-circulação continuada da solução nutritiva em circuito fechado;¹¹
- (tc) A zona2 é paralelepípedica ou cúbica e o seu escoamento processa-se, numa única face, ou, entre duas faces simétricas, cujas normais, são, em qualquer dos casos, colineares à horizontal do circuito;
- (ce,de,tc) Nenhuma destas condições pode ou deve ser violada em nenhum momento;

A classificação de um qualquer conjunto de *estruturas de zona*, produzidas, beneficia de se desenvolver o conteúdo sobre os seus *modos de atividade*. O **modo de atividade** é um vetor numérico, $[1 \times 2]$, que indica do número de *fachadas ativas* presentes numa *estrutura de zonas* e do número de *faces ativas* presentes na *zona de escoamento* atinente.

$$[\text{modo de atividade}] = \{N^{\circ}_{\text{fachadas ativas}}, N^{\circ}_{\text{faces ativas/zona2}}\} \quad (11)$$

Dizem-se de **fachadas ativas** todas aquelas que vem efetivamente representadas na *estrutura de zonas* de um circuito - seja a fachada de alimentação, a fachada de colecção ou, ambas. E dizem-se de **faces ativas** todas aquelas que vem efetivamente atravessadas por fluxo de solução no domínio da zona2.

Pelas regras de integridade previamente apresentadas, de coesão, dinâmica de escoamentos e tipologia de circuitos, e pela natureza intrínseca ou acessória de cada zona desenvolvida, temos que a zona2 de um circuito, intrínseca à estrutura de zonas, terá sempre **pelo menos uma face ativa e não mais de duas**, caso último em que são simétricas. E, adicionalmente, pelo que já se falou sobre a presença de zonas intrínsecas e acessórias nos circuitos, e sobre as suas estruturas

¹⁰ A satisfação desta condição requer a presença das zonas intrínsecas no desenho de estrutura de zonas do circuito. Em caso negativo, a dinâmica global dos escoamentos que é desenvolvida no circuito não garante a irrigação do rizoma. Esta é uma das razões pelas quais as zonas homónimas são intrínsecas.

¹¹ A condição de re-circulação pode ser garantida tanto numa estrutura com zonação exclusivamente intrínseca como numa estrutura com zonação mista, i.e. adicionada de zonas acessórias.

zonais, retira-se que qualquer que seja a zonação construída, terá sempre presente as zonas 1 e 2, e logo terá sempre **pelo menos uma fachada de alimentação ativa**, com a possibilidade de **no máximo ser complementada por uma fachada de colecção ativa**.

Posto isto, a dedução é imediata que existem quatro modos de atividade distintos e válidos, possíveis de atribuição à classificação das *estruturas de zona* produzidas. São eles,

$$[modo\ de\ atividade]_1 = \{1,1\}$$

$$[modo\ de\ atividade]_3 = \{2,1\}$$

$$[modo\ de\ atividade]_2 = \{1,2\}$$

$$[modo\ de\ atividade]_4 = \{2,2\}$$

Para concretizarmos a discussão conceptual sobre *estruturas de zona* que vimos a desenvolver neste tópico, apresentam-se nas tabelas 4 a 7, todas as atribuições matriciais ao *vetor de zonas* que estão previstas na sua variabilidade à atribuição. Acompanhadas por diagramas esquemáticos apropriados que traduzem em informação visual o vetor de zonas definido. Os diagramas usam de **elementos geométricos**, como os da figura em baixo, para representarem elementos de zona, objectos de zona e o percurso global dos escoamentos.

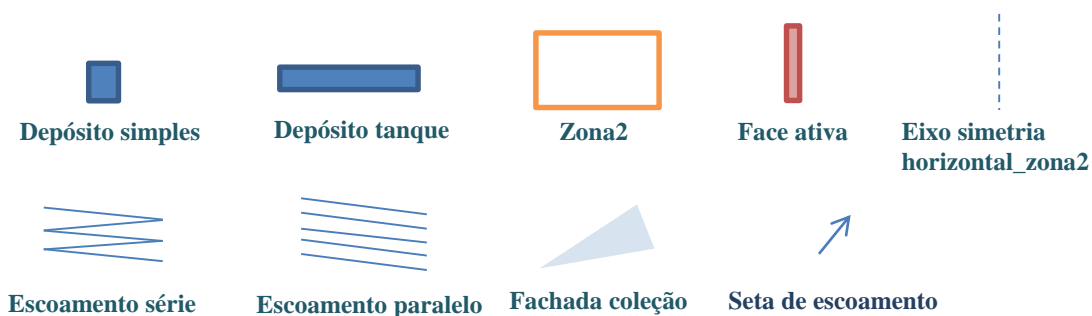


Figura 6 - Legenda dos objetos/elementos da estrutura zonal presentes no diagrama esquemático das estruturas de zona.

Como exemplo de leitura descritiva da informação nestes esquemas diagramáticos, apresentamos em baixo uma figura descritiva e a respetiva descrição.

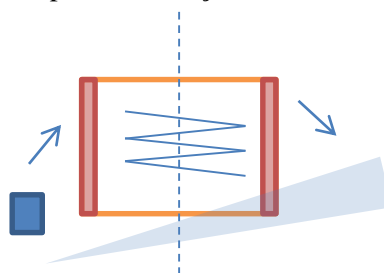


Figura 7 - Diagrama esquemático ilustrativo de uma estrutura zonal, fazendo uso dos elementos da figura2.

O circuito supra-apresentado é constituído por um depósito de alimentação único integrado numa fachada de alimentação activa, que escoar solução através de uma face de alimentação para o interior da zona2, onde percorre em série os níveis de crescimento da bancada de

crescimento, saído por fim por uma face simétrica de colecção que dá para uma fachada de colecção transversal que realimenta o depósito da zona1.

Tabela 5 – Atribuições de *handles* válidas para o modo de actividade [1fachada,1face]

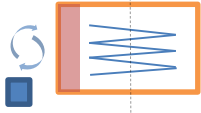
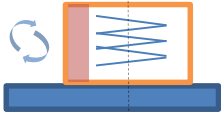
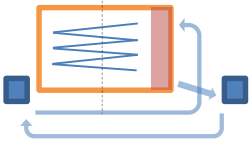
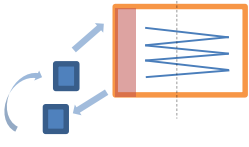
Vetor de zona (atribuição)	Zonação	Diagrama
único_simples, NULL, alinhada, alinhada, série, Ø, NULL	$Z(1,2)_{\{1,1\}}$	
único_tanque, NULL, alinhada, alinhada, série, Ø, NULL	$Z(1,2)_{\{1,1\}}$	
indep.com, simétricos, cruzada, alinhada, série, Ø, NULL	$Z(1,2,4)_{\{1,1\}}$	
indep.com, assimétricos, alinhada, alinhada, série, Ø, NULL	$Z(1,2,4)_{\{1,1\}}$	
Atributos do modo: colecção_alinhada, escoamentos_série, Ø_fachada colecção		

Tabela 6 – Atribuições de *handles* válidas para o modo de actividade [1fachada,2faces]

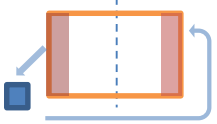
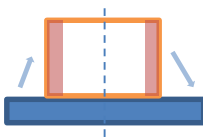
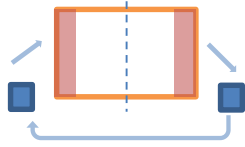
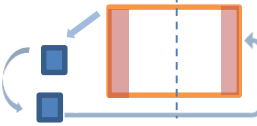
Vetor de zona (atribuição)	Zonação	Diagrama
único_simples, NULL, alinhada, alinhada, série/paralelo, Ø, NULL	$Z(1,2)_{\{1,2\}}$	
único_tanque, NULL, alinhada, alinhada, série/paralelo, Ø, NULL	$Z(1,2)_{\{1,2\}}$	
indep.com, simétricos, alinhada, alinhada, série/paralelo, Ø, NULL	$Z(1,2,4)_{\{1,2\}}$	
indep.com, assimétricos, cruzada, alinhada, série/paralelo, Ø, NULL	$Z(1,2,4)_{\{1,2\}}$	
Atributos do modo: colecção_alinhada, escoamentos_série/paralelo, Ø_fachada colecção		

Tabela 7 – Atribuições de *handles* válidas para o modo de actividade [2fachadas,1face]

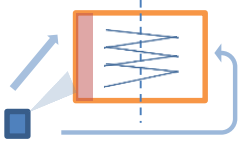
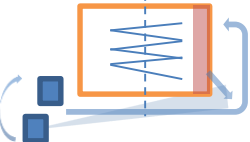
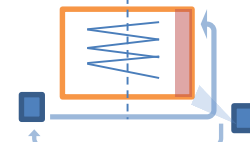
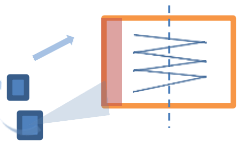
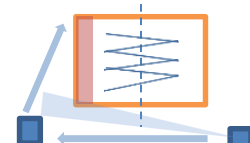
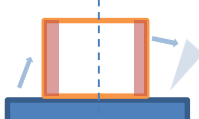
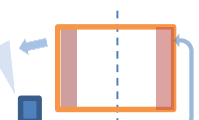
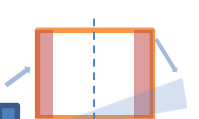
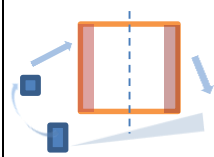
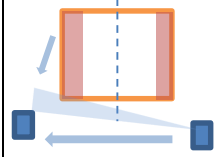
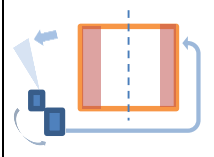
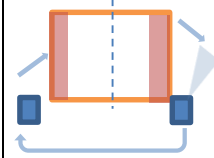
Vetor de zona (atribuição)	Zonação	Diagrama
único_simples, NULL, alinhada, alinhada, série, I, local	$Z(1,2,3)_{\{2,1\}}$	
indep.com, assimétricos, cruzada, cruzada, série, I, transversal	$Z(1,2,3,4)_{\{2,1\}}$	
indep.com, simétricos, cruzada, alinhada, série, I, local	$Z(1,2,3,4)_{\{2,1\}}$	
indep.com, assimétricos, alinhada, alinhada, série, I, local	$Z(1,2,3,4)_{\{2,1\}}$	
indep.com, simétricos, alinhada, cruzada, série, I, transversal	$Z(1,2,3,4)_{\{2,1\}}$	
Atributos do modo: escoamentos_série; I_fachada colecção		

Tabela 8. Atribuições de *handles* válidas para o modo de actividade [2fachadas,2faces]

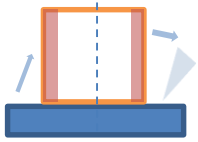
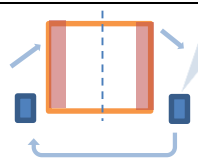
Vetor de zona (atribuição)	Zonação	Diagrama
único_tanque, NULL, alinhada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3)_{\{2,2\}}$	
único_simples, NULL, cruzada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3)_{\{2,2\}}$	
único_simples, NULL, alinhada, cruzada, série/paralelo, I, transversal	$Z(1,2,3)_{\{2,2\}}$	

indep.com, assimétricos, alinhada, cruzada, série/paralelo, I, transversal	$Z(1,2,3,4)_{\{2,2\}}$	
indep.com, simétricos, cruzada, cruzada, série/paralelo, I, transversal	$Z(1,2,3,4)_{\{2,2\}}$	
indep.com, assimétricos, cruzada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3,4)_{\{2,2\}}$	
indep.com, simétricos, alinhada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3,4)_{\{2,2\}}$	
Atributos do modo: escoamentos_série/paralelo; I_fachada coleção		

Deve-se atender a que zonações com menor número de zonas não se traduzem necessariamente em zonações com melhores práticas de consumo de recursos, como sejam água ou energia, ou em zonações com maior simplicidade estrutural. Cada zonação requer a aplicação das adequadas análises funcionais e estruturais por forma a se poder concluir correctamente sobre as suas características de desempenho, de consumo e de estrutura.

Escolhemos de desenvolver três atribuições/estruturas de zonas (EZ) para o desenho dos nossos circuitos, que dão pelas identidades EZ_1 , EZ_2 e EZ_3 , e que são divergentes ao nível do modelo - e assim distam de um circuito por entre as suas linhas de desenho, i.e. aquelas nas quais são expressas.

Tabela 9. Quadro-resumo das estruturas de zona usadas para desenvolvimento dos circuitos do trabalho.

id_estrutura	Vetor de zona (atribuição)	Zonação	Diagrama
EZ_1	único_tanque, NULL, alinhada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3)_{\{2,2\}}$	
EZ_2, EZ_3	indep.com, simétricos, alinhada, alinhada, série/paralelo, I, local	$Z(1,2,3,4)_{\{2,2\}}$	

Uma pequena explicação pode ser avançada para a escolha destas duas zonações. Num primeiro momento porque a zonação a quatro zonas escolhida é uma das mais prevalentes na literatura de circuitos hidropónicos, tendo influenciado fortemente a nossa imagem inicial do que é um circuito hidropónico. Pela sua ubiquidade, o estudo desta *estrutura de zonas* encerra em si um valor

pedagógico importante ao solidificar o nosso conhecimento sobre uma realidade comumente adoptada na construção de circuitos. Num segundo momento a escolha da estrutura a três zonas resulta de uma procura simplificada em otimizar a estrutura de quatro zonas - no caso, pela subtração de uma zona ao circuito (a zona 4), ficando este a operar somente com um único depósito, de modelo tanque. Este depósito único pretendia simplificar estruturalmente o circuito, e permitir um comparativo de consumo entre o que ganhamos em menor consumo de energia para bombagem na realimentação e o que perdemos em maior consumo de volume de água nos depósitos.

Por este momento encontramos-nos já com o primeiro *nível de estrutura* dos nossos circuitos produzido e atribuído, segundo as seguintes árvores de desenho.

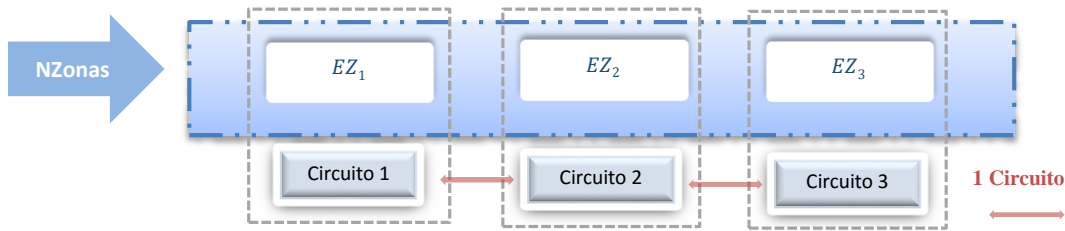


Figura 8 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento do *nível de estrutura de zonas*.

(2) Nível de Estrutura de Campos (de Desempenho)

Como apontado no parágrafo anterior, numa primeira fase, prévia ao desenho dos circuitos, fizemos uma recolha *online* de imagens, esquemas de montagens e literatura relacionada, que nos informasse de como montar os circuitos para as técnicas desejadas. Esta pesquisa não ficou registada mas contribuiu para inspirar a criação dos nossos circuitos e permitiu-nos identificar, de entre outras coisas, um conjunto de *parâmetros de ajuste de estrutura* que podem ser usados para a caracterização genérica de *campos de desempenho* do circuito. Estes parâmetros constituem-se, novamente, e pelo método de desenho já introduzido (ver início do capítulo), numa matriz de parametrização, neste caso afeta ao que chamámos de, *nível de estrutura de campos (de desempenho)*, e que vai pelo nome de *matriz de campos de desempenho*.

O *nível de estrutura de campos* é o segundo nível a ser aplicado ao desenho ordenado de um circuito e produz a sua *estrutura de campos de desempenho*, é descrito por um subdomínio de parametrização, na forma matricial matriz-lista, dimensão [6x7], que vem atribuída de vinte e cinco parâmetros de ajuste-de-estrutura, distribuídos por sete campos de desempenho (ou atividade) e que dá pelo nome de *matriz de campos de desempenho*. Prevê variabilidade na atribuição e divergência do tipo M, *condicionalidade intrínseca e herdada*.

$$S_{1,2} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ x_{16} & x_{17} & x_{18} & x_{19} & x_{20} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

A *matriz de campos de desempenho* resulta da aplicação (paramétrica) do operador *matriz de parametrização* sobre o *subdomínio de parametrização* definido para o *nível de estrutura de campos*.

$$[Matriz_{de\ Campos\ de\ Desempenho}]: Matriz_{Parametrização}(S_{1,2}) \quad (13)$$

$x_1 = H_{Máx\ circuito}$	$x_{10} = N^o_{plantas\ suportadas\ (p/cota)\ (zona2)}$	$x_{19} = Técnicas\ de\ Crescimento$
$x_2 = L_{Máx\ circuito}$	$x_{11} = N^o_{plantas\ suportadas\ (circuito)}$	$x_{20} = Confinamento_{escoamentos(zona3)}$
$x_3 = C_{Máx\ circuito}$	$x_{12} = Densidade_{plantas\ suportadas}$	$x_{21} = Escoamento_{entre\ andares(zona3)}$
$x_4 = Área_{chão\ ocupada}$	$x_{13} = Escoamento_{entre\ andares\ (zona2)}$	$x_{22} = Coletor\ Intermédio_{(zona3)}$
$x_5 = Geometria\ Base$	$x_{14} = Depósitos_{(circuito)}$	$x_{23} = N^o_{calhas\ coleção\ (p/cota)\ (zona3)}$
$x_6 = Geometria\ Base$	$x_{15} = H_{água,depósitos}$	$x_{24} = Confinamento_{escoamentos(zona4)}$
$x_7 = Exposição_{folhosas\ à\ radiação}$	$x_{16} = Confinamento_{escoamentos(zona2)}$	$x_{25} = N^o_{condutores\ (zona4)}$
$x_8 = N^o_{cotas\ de\ produção}$	$x_{17} = Fachada\ de\ Coleção_{(zona3)}$	
$x_9 = N^o_{camas\ de\ crescimento\ (p/cota)\ (zona2)}$	$x_{18} = Realimentação_{(zona4)}$	

A *matriz de campos de desempenho* produz *estruturas de campos de desempenho*, viáveis e plenamente definidas, para o desenho do circuito. A *estrutura de campos de desempenho* adiciona ao preenchimento estrutural da *estrutura de zonas* (do circuito) e ajusta a sua estrutura a todas e a quaisquer expectativas de desempenho que sejam definidas para os seus *campos (de desempenho)*. Os *campos de desempenho* (como definidos no corrente trabalho), são seis, e dão pelos nomes de, *preenchimento do espaço interior*, *interssecção da radiação interior*, *suporte de plantas*, *circulação de água*, *coleção de água*, *alimentação de água* e *técnicas de crescimento*.¹²
13 14

A figura seguinte apresenta a nossa *matriz tipológica de campos de desempenho*.

¹² Apesar dos campos-guia possibilitarem tirar-se um apontamento genérico das condições de operação e desempenho de um circuito, não excluem a sua necessidade de ser sujeito a uma análise funcional adequada que descreva correctamente a sua operação.

¹³ Alguns dos campos-guia e seus parâmetros de ajuste de estrutura respeitam mais ao desempenho do circuito a nível da sua integração no meio físico local envolvente do ambiente interior da unidade, enquanto outros respeitam à operação mecânica, hidráulica ou produtiva imediata à estrutura do circuito.

¹⁴ A aplicação dos *campos de atividade* ao desenho da estrutura de campos de um circuito faz-se pela atribuição de valores desejados aos parâmetros de ajuste desses campos, de tal forma que, estes (os campos), se alinhem com os desempenhos específicos desejados para cada campo na sua área de atividade específica.

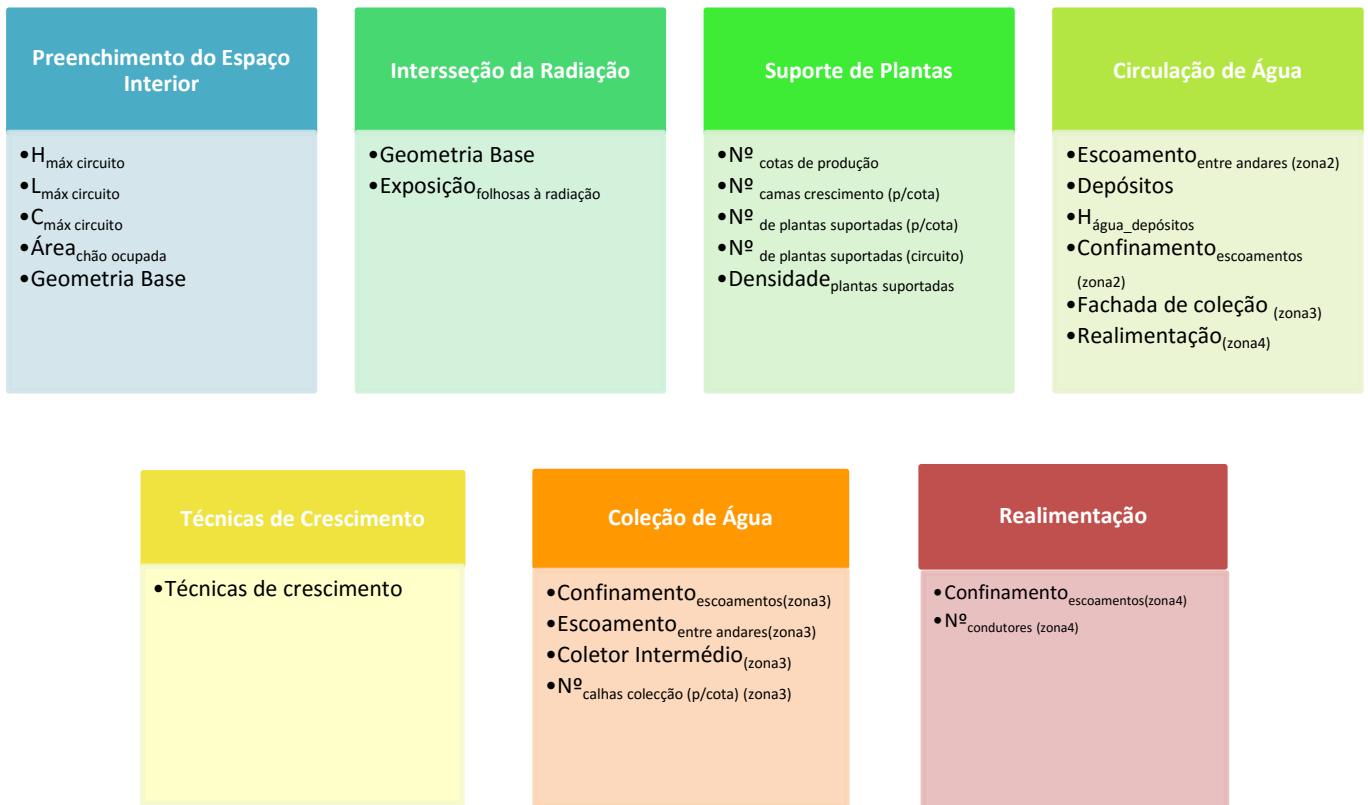


Figura 9 - Matriz de parametrização de campos de desempenho usada na caracterização do nível de estrutura de campos aplicado ao estudo dos presentes circuitos.

Os parâmetros da matriz e os campos de desempenho onde são colocados merecem uma breve explicação, desenvolvida na tabela posterior. Note-se que a *matriz de campos* é a segunda estrutura de parametrização a ser aplicada ao desenho ordenado do circuito. Identifica-se que, adicionalmente a sofrer de *condicionalidade intrínseca*, sofre de *condicionalidade herdada*, esta última por parte da estrutura *vetor de zonas* que participa na sua linha de desenho. As condições, quer intrínsecas, quer herdadas, de parametrização da matriz, são apresentadas, onde existem e parâmetro-a-parâmetro, nos comentários e notas da tabela que segue.¹⁵

Tabela 10 - Quadro-resumo dos parâmetros de campo constituintes das matrizes de campos de desempenho do nível de estrutura de campos.

	Parâmetro	Atributo /tipo/dimensão/unidade	Obs.
Preenchimento	○ $H_{\text{Máx circuito}}$	• /numérico,decimal/L/m	Este parâmetro indica o valor da altura máxima que se encontra definida para o conjunto dos pontos do circuito, quando medida como a distância entre os pontos mais afastados da sua dimensão vertical.

¹⁵ Note-se que variáveis de atribuição homóloga entre estruturas são uma forma de *condicionalidade herdada* entre estruturas.

	○ $L_{Máx\ circuito}$	▪ $/número,decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica o valor da largura máxima que se encontra definida para o conjunto dos pontos de um circuito. Medida relativamente à distância entre os pontos mais afastados da sua dimensão horizontal.
	○ $C_{Máx\ circuito}$	▪ $/número,decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica o valor da lonjura máxima que se encontra definida para o conjunto dos pontos de um circuito. Medida relativamente à distância entre os pontos mais afastados da sua dimensão longitudinal.
	○ $\text{Área}_{chão\ ocupada}$	▪ $/número,decimal/L^2/m^2$	Este <i>parâmetro</i> define o valor da largura de chão ocupada pela projecção da base do circuito sobre o solo onde se apoia. Este valor não respeita a áreas sombreadas produzidas pelo circuito.
	○ <i>Geometria Base</i>	▪ $/string,discreta/--/--$ ▪ <i>e.g. cilíndrica, cúbica</i>	Este <i>parâmetro</i> informa do sólido geométrico a três dimensões que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões do circuito. Apesar de ser óbvio de que a forma geométrica escolhida influi sobre a ocupação do espaço interior por parte do circuito, é igualmente verdade que a escolha desta variável também influencia o grau de exposição das folhosas das plantas à radiação solar interior – com o derivado impacto na qualidade de intersecção e captação efetiva de radiação solar pelas plantas. Por esta razão a mesma variável vem expressa no campo <i>Intersecção da Radiação Interior</i> .
Intersecção da Radiação Interior	○ <i>Geometria Base</i>	▪ $/string,discreta/--/--$ ▪ <i>e.g. cilíndrica, cúbica</i>	Ver parâmetro <u><i>geometria_base</i></u> no campo <i>preenchimento do espaço interior</i> .
	○ $\text{Exposição}_{folhosas\ à\ radiação}$	▪ <i>periferia</i> $/string,discreta/--/--$ ▪ <i>interior</i> $/string,discreta/--/--$ ▪ <i>ambos</i> $/string,discreta/--/--$	A <u><i>geometria_base</i></u> de um circuito pode ser construída de tal forma que favoreça a colocação das camas de crescimento preferencialmente no perímetro da sua geometria ou opostamente no seu interior. Para auferir sobre a opção do circuito a este respeito definiu-se a variável <u><i>exposição das folhosas à radiação</i></u> que informa sobre se as camas de crescimento no circuito se encontram dispostas na <i>periferia</i> do circuito, no seu <i>interior</i> ou em <i>ambos</i> locais.

			Quando as camas de crescimento estão preferencialmente no interior da geometria é provável que os sombreamentos sobre elas produzidas sejam mais acentuados.
Suporte de Plantas	○ N° cotas de produção	▪ /numérico,inteiro/--/--	Este <i>parâmetro</i> identifica o número de andares de produção presentes na <i>zona de crescimento</i> (zona2) do circuito.
	○ N° camas de crescimento (p/cota)	▪ /numérico,inteiro/--/--	Este <i>parâmetro</i> identifica o número de camas de produção ¹⁶ (da zona2 do circuito), que estão presentes em cada andar de produção.
	○ N° plantas suportadas (p/cota)	▪ /numérico,inteiros/--/--	Este <i>parâmetro</i> identifica o número total de suportes individuais de crescimento de plantas, presentes em cada andar de produção do circuito.
	○ N° plantas suportadas (circuito)	▪ /numérico,inteiros/--/--	Este <i>parâmetro</i> identifica o número total de suportes individuais de crescimento de plantas presentes no conjunto do circuito.
	○ $Densidade_{plantas\ suportadas}$	▪ $\left(\frac{N^{\circ}_{plantas\ suportadas}}{Área_{chão\ ocupada}} \right)$ /numérica,decimal/L ⁻² /m ⁻²	A <i>densidade de plantas no circuito</i> , definida pela razão entre $N^{\circ}_{plantas\ suportadas}$ e a $Área_{chão\ ocupada}$, informa sobre a capacidade do circuito em empacotar a sua produção.
Circulação de Água	○ $Escoamento_{entre\ andares\ (zona2)}$ [vetor de zonas]	▪ <i>paralelo</i> /string,discreta/--/-- ▪ <i>série</i> /string,discreta/--/--	O <i>escoamento entre andares</i> é classificado como em <i>paralelo</i> ou em <i>série</i> e informa se os andares de produção da zona2 estão ligados em série ou em paralelo e imediatamente se o escoamento na zona2 percorre os andares de produção em série ou se se distribui pelo seu conjunto em paralelo. ¹⁷

¹⁶ Uma **cama de crescimento** é um volume de controlo localmente atribuído a toda a extensão de qualquer objeto de zona2 que confine uma superfície de alimentação de solução nutritiva e respetivos rizomas. Uma *cama de crescimento* somente é extensível à extensão local do escoamento contínuo confinado no elemento respetivo de zona2 (a que está subordinada), e deve sempre incorporar a interface de contato entre o rizoma e a solução nutritiva de alimentação.

¹⁷ Tal qualidade do escoamento na zona2 é importante para a definição de caminhos de bombagem e distribuição da bombagem na zona1, para a definição da estrutura de recolção na zona3 e para a avaliação do transporte de nutrientes e propagação de doenças na zona2.

○ <i>Depósitos</i> [vetor de zonas]	<ul style="list-style-type: none"> • <i>único_simples</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>único_tanque</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>independentes com.</i>_{/string,discreta/--/--} 	A variável <i>depósitos</i> pode tomar os valores <i>único_simples</i> , <i>único_tanque</i> ou, <i>independentes comunicantes</i> . Informa de se existe um único depósito no circuito, caso em que funciona como alimentação e coleção, ou, se existem depósitos independentes comunicantes, um para a alimentação e outro para coleção.
○ <i>H_{água,depósitos}</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/numérico,decimal/L/m</i> 	A altura da água nos depósitos informa da altura da superfície livre em estado estacionário dos volumes de água presentes em todos os depósitos do circuito. É uma quantidade importante para a modelação da bombagem de água nos depósitos e influi diretamente no pé direito do contentor.
○ <i>Confinamento</i> _{escoamentos (p/cota)(zona2)}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>calha</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>lençol</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>tanque</i>_{/string,discreta/--/--} 	A variável <i>confinamento</i> informa sobre o(s) tipo(s) de confinamento(s) a que o escoamento está sujeito quando percorre a zona2, em cada um dos andares de produção. Pode tomar os valores, <i>calha</i> , <i>lençol</i> ou <i>tanque</i> , que devem ser escolhidos atendendo a quais as <i>técnicas de crescimento</i> que estão empregues em cada andar de produção da zona2 – <i>calha</i> ou <i>lençol</i> valem para a técnica <i>NFT</i> e <i>tanque</i> vale para a técnica <i>DFH</i> .
○ <i>Fachada de Coleção</i> _(zona3) [vetor de zonas]	<ul style="list-style-type: none"> • <i>I</i>_{/lógico,discreto/--/--} • <i>Ø</i>_{/lógico,discreto/--/--} 	A variável <i>fachada de coleção</i> informa de se existe fachada de coleção no circuito (<i>ergo</i> zona3) e pode tomar os valores <i>I</i> (sim) ou <i>Ø</i> (não). Esta variável influencia se a <i>matriz de campos (de desempenho)</i> tem 6 ou 5 campos na sua estrutura, visto que define se o campo <i>Coleção de Água</i> é necessário.
○ <i>Realimentação</i> _(zona4) [vetor de zonas]	<ul style="list-style-type: none"> • <i>I</i>_{/lógico,discreto/--/--} • <i>Ø</i>_{/lógico,discreto/--/--} 	A variável <i>realimentação</i> informa de se existe zona de realimentação no circuito (<i>ergo</i> zona4) e pode tomar os valores <i>I</i> (sim) ou <i>Ø</i> (não). Esta variável influencia se a <i>matriz de campos (de desempenho)</i> tem 6 ou 7 campos na sua estrutura, visto que define se o campo <i>Realimentação de Água</i> é necessário.

Colecção de Água	○ <i>Confinamento</i> _{escoamentos (p/cota)(zona3)}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>calha</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>lençol</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>queda livre</i>_{/string,discreta/--/--} 	O parâmetro <i>confinamento</i> informa se os escoamentos na <i>zona de coleção</i> (p/andar) ocorrem de forma confinada e nesse caso recebe o valor <i>calha</i> ou <i>lençol</i> , ou se os escoamentos se desenvolvem em <i>queda livre</i> .
	○ <i>Escoamento</i> _{entre andares(zona3)}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>paralelo</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>série</i>_{/string,discreta/--/--} 	O parâmetro <i>escoamento...entre andares</i> é homólogo ao do campo <i>Circulação de Água</i> mas tem a sua aplicação feita à zona3.
	○ <i>Coletor Intermédio</i> _(zona3)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>I</i>_{/lógico,discreto/--/--} • \emptyset_{/lógico,discreto/--/--} 	O parâmetro <i>coletor...intermédio</i> indica se o escoamento que vem da coleção passa temporariamente por um coletor intermédio antes de chegar aos depósitos, (valor <i>I</i>) ou se dispensa tal estrutura (valor \emptyset).
	○ <i>Nº calhas de coleção (p/cota) (zona3)</i>	• <i>/numérico,inteiro/--/--</i>	Este parâmetro identifica o número de calhas de coleção que recolhem solução, à saída de cada andar da zona2.
Técnicas de Crescimento	○ <i>Técnicas de Crescimento</i> _(p/cota)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>NFT</i>_{/string,discreto/--/--} • <i>DFH</i>_{/string,discreto/--/--} • <i>Ebb&Flow</i>_{/string,discreto/--/--} 	A variável e campo <i>técnicas de crescimento</i> identifica quais as técnicas hidropónicas em uso no conjunto das camas de crescimento da zona2 do circuito e pode tomar os valores <i>NFT</i> , <i>DFH</i> , <i>Ebb&Flow</i> , ou, uma combinação dos vários. A sua atribuição é feita por andar, e em cada um, vem sub indexada da identidade das camas de crescimento que operam nessa técnica.
Realimentação	○ <i>Nº condutores (zona4)</i>	• <i>/numérico,inteiro/--/--</i>	Este parâmetro identifica o número total de condutores de caudal que existem na realimentação a ligar cada depósito de coleção a cada depósito de alimentação.
	○ <i>Confinamento</i> _{escoamentos (zona4)}	<ul style="list-style-type: none"> • <i>mangueira</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>placa</i>_{/string,discreta/--/--} 	Este parâmetro identifica a natureza de cada condutor de caudal que existem na realimentação a ligar cada depósito de coleção a cada depósito de alimentação.

Aplicar de *variabilidade na atribuição* a esta *matriz de campos de desempenho* produz divergência do tipo M para as *estruturas de campos* (produzidas). Sendo ao nível do modelo, tais estruturas devem distar de um circuito de diferença entre as linhas de desenho. Neste trabalho

fizemos três atribuições diferentes à matriz tipológica de *campos de desempenho* e produzimos assim três *estruturas de campos de desempenho* (ECD) divergentes ao nível do circuito. Estas três estruturas foram classificadas por nomes adequados que realçassem alguma da sua característica identificativa. As estruturas produzidas são a ECD₁, ECD₂ e ECD₃ e dão pelos nomes de *SinglePond*, *TriangleStand* e *LongStand*. As suas atribuições estão listadas na tabela seguinte, seguidas de um apontamento genérico sobre cada uma, que é acompanhado por uma imagem da sua *estrutura de campos* correspondente (adicionada dos limites de controlo das adequadas zonas de escoamento).^{18 19 20}

Algumas figuras da estrutura podem apresentar *elementos de estrutura*, nas zonas 3 e 1, que não vêm parametrizados na respetiva *matriz de campos* - como sejam objetos das fachadas de coleção ou de alimentação; estes servem somente como adereços para enriquecerem a imagem que o leitor faz do circuito. Inversamente alguns elementos caracterizados na *matriz de campos*, em particular no campo *Alimentação de Água*, como as mangueiras de alimentação, não vem apresentados nas figuras das *estruturas de campos*, porque a sua presença sem caracterização adicional de outros parâmetros não se constitui como adequada nem relevante para elucidar sobre aspetos adicionais da natureza da *estrutura de campos* do circuito. A *alimentação de solução* será extensamente tratada no próximo *nível de estrutura* estudado e adicionalmente será abordada analiticamente no estudo da hidráulica do circuito.²¹

Tabela 11 – Atribuições à matriz de campos de desempenho que foram estudadas.

Estruturas de Campos de Desempenho				
	unidades	ECD ₁ - <i>SinglePond</i>	ECD ₂ - <i>TriangleStand</i>	ECD ₃ - <i>LongStand</i>
Geometria base	--	cubo	prisma triangular	paralelepípedo
H _{máx} circuito	[m]	2.34	1.93	2.10
C _{máx} circuito	[m]	2.72	4.46	8.28
L _{máx} circuito	[m]	2.31	1.60	1.29
Área _{chão ocupada}	[m ²]	6.27	7.12	10.68
Exposição folhosas à radiação	--	interior	interior	interior
N ^o cotas de produção	--	4	9	3
N ^o camas crescimento (p/cota)	--	(12,12,12,1)	2*	(18, 18, 18)
N ^o de plantas suportadas (p/cota)	--	(156,156,156,48)	26*	(234, 234, 234)
N ^o de plantas suportadas (circuito)	--	516	234	702
Densidade _{plantas suportadas(circuito)}	$[\frac{plantas}{m^2}]$	82	33	66
Escoamento _{entre cotas (zona2)}	--	paralelo	paralelo	paralelo
Confinamento _{escoamentos(p/cota)(zona2)}	--	(calha1:12,calha1:12,calha1:12,tanque1)	calha1:2*	(calha1:18,calha1:18,calha1:18)
Fachada de coleção _(zona3)	--	I	I	I
Realimentação _(zona4)	--	Ø	I	I
Depósitos	--	único_tanque	independentes com.	independentes com.
H _{água_depósitos}	[m]	0.3	0.3	0.3

¹⁸ As dimensões geométricas presentes nestas figuras respeitam somente ao preenchimento do espaço interior por parte do circuito, sendo complementadas com a altura das cotas de produção.

¹⁹ Não há detalhe dimensional para elementos de nenhuma zona, porque estes são descritos mais adiante em lugar próprio.

²⁰ Algumas zonas das figuras encontram-se sobrepostas porque partilham elementos necessários ao escoamento em ambas as zonas.

²¹ O * ao lado de um valor significa que a sua atribuição é do tipo vetor onde todas as posições tem o mesmo valor. Esta notação utilizou-se quando o vetor a representar resultasse muito extenso.

Técnicas de crescimento (p/cota)	--	(NFT,NFT,NFT,DFH)	NFT*	(NFT, NFT, NFT)
Nº de calhas coleção (p/cota) (zona3)	--	(1,1,1,0)	1*	(1,1,1)
Escoamento entre andares (zona3)	--	Paralelo	paralelo	paralelo
Coletor Intermédio (zona3)	--	I	Ø	I
Confinamento escoamentos (p/cota) (zona3)	--	(calha, calha, calha, Ø)	calha*	(calha, calha, calha)
Nº condutores (zona4)	--	0	1	1
Confinamento escoamentos (zona4)	--	NULL	mangueira	mangueira

- a estrutura de campos **SinglePond** é cúbica, robusta, de aparência massiva, com depósito único e circulação em paralelo pelas três cotas de produção em técnica *NFT*; permite uma densidade elevada no suporte de plantas, para a qual contribuem a área de ocupação baixa e o aproveitamento do depósito único tipo tanque como cota de produção em técnica *DFH*. Aparece uma exposição baixa à radiação e muitos ângulos para a formação de sombras sobre as calhas, daí considerar-se, sem estudo prévio, que o seu posicionamento dentro da sala deve procurar radiação directa, de preferência com orientação da superfície das camas a Sul, ficando próximo às janelas. Possui um volume permanente de água elevado devido ao depósito pensado para *DFH*. Pela mesma razão poderá ter necessidades de oxigenação mais elevadas.

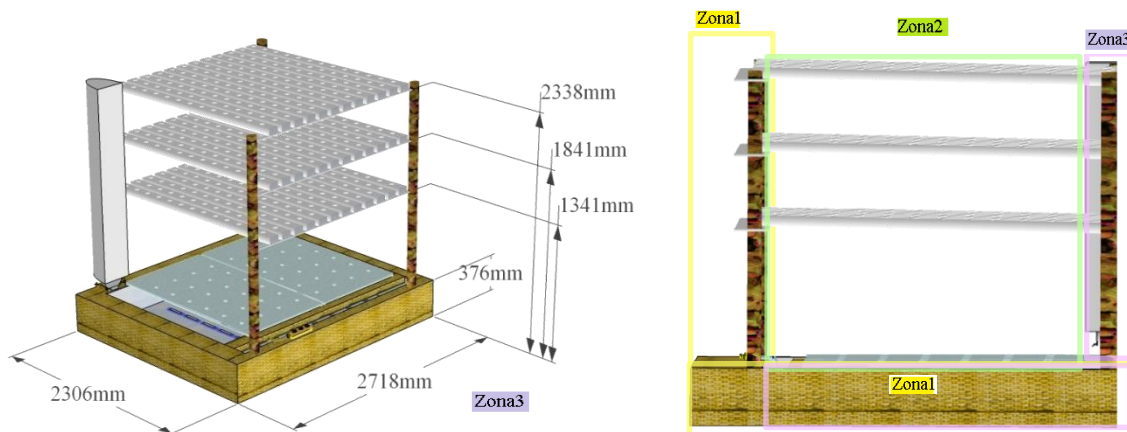


Figura 10 – Estrutura de campos *SinglePond*: figura e perfil de realce das zonas de escoamento.

- a estrutura de campos **TriangleStand** é prismática triangular, de desenho leve, com dois depósitos independentes comunicantes, dezoito camas de crescimento dispostas nas faces laterais do prisma e distribuídas simetricamente por nove cotas de produção; escoamentos paralelos entre andares em ambas as faces, confinados por calhas. É uma estrutura baixa que não bloqueia completamente a passagem de radiação para o restante da habitação; foi pensada para explorar a radiação nas fachadas este-oeste e a radiação difusa no interior da sala; tem uma boa superfície de interseção ao colocar as estruturas verdes das plantas na periferia da geometria, ajudando a limitar sombras e obstáculos para a radiação directa e difusa. Tem uma capacidade de suporte de plantas relativamente baixa para uma área de ocupação média, daí ser uma estrutura com baixa densidade de suporte. Opera unicamente com a técnica *NFT*.

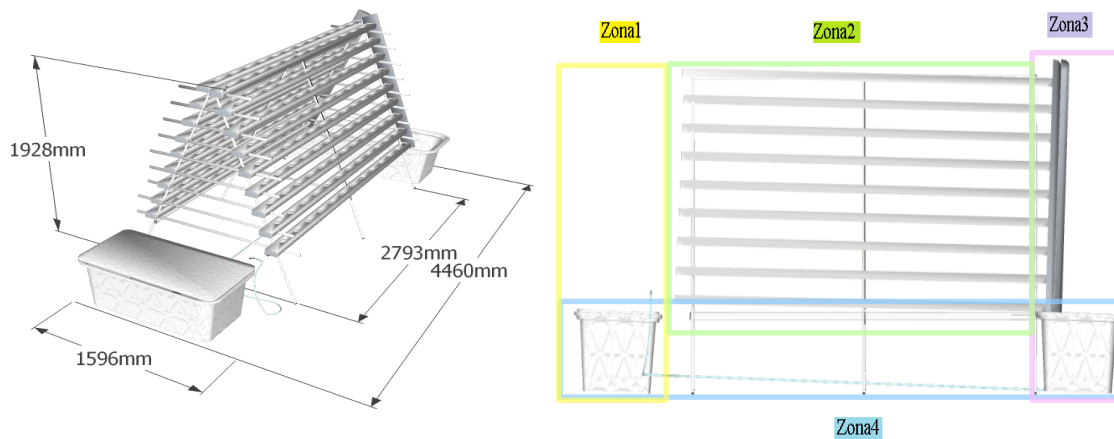


Figura 11 – Estrutura de campos *TriangleStand*: figura e perfil de realce das zonas de escoamento.

- o a *estrutura de campos LongStand* é uma estrutura longa de geometria base paralelepipedica que explora o seu comprimento como elemento potenciador do suporte de plantas; pela mesma razão ocupa uma área de chão elevada e a sua densidade de suporte situa-se entre a das outras estruturas. A intersecção de radiação pode ser prejudicada no caso de estruturas que se situem longe dos vãos das fachadas e a sobreposição de cotas de produção prejudica a intersecção de radiação directa e difusa nas camas inferiores. É aconselhável colocá-la junto às janelas. O seu comprimento por outro lado facilita a ocupação do espaço interior. Um potencial problema da estrutura, novamente relacionado ao seu comprimento, é o da depleção de oxigénio e nutrientes na direcção longitudinal do escoamento à medida que este se desloca para jusante através do rizoma. Este problema é discutido no estudo da hidráulica dos circuitos. Possui dois depósitos *independentes comunicantes* que em função da distância a que estão separados impõe necessidades várias de potência de bombagem na realimentação. Tem três *cotas de produção* ligadas em paralelo, operando com a técnica *NFT*.

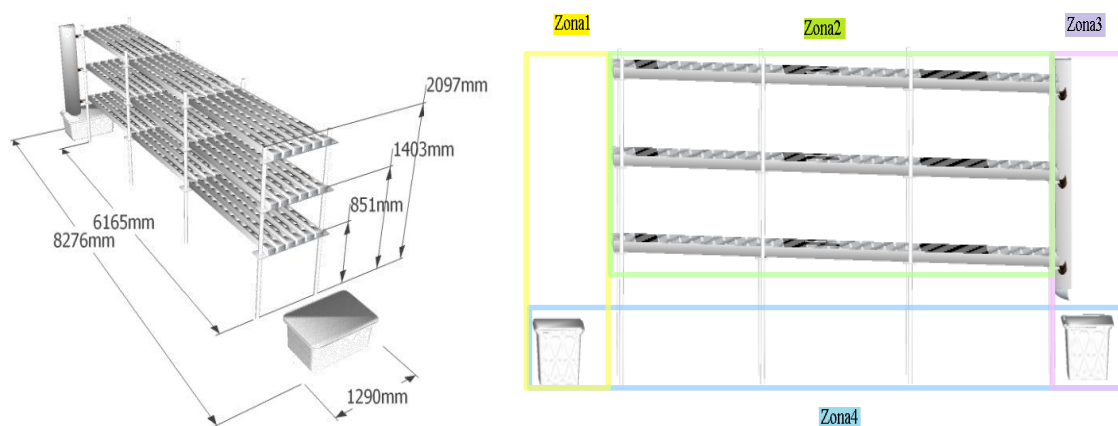


Figura 12 – Estrutura de campos *LongStand*: figura e perfil de realce das zonas de escoamento.

Neste momento temos as *estruturas de campos de desempenho* e o respetivo *nível de estrutura de campos de desempenho* caracterizados. Apresentamos o estado corrente de preenchimento das árvores de desenho dos nossos circuitos - sobre um fundo de níveis de estrutura – já depois de aplicadas as corretas regras de diferenciação das versões e modelos de um circuito, (como foram apresentadas no preâmbulo introdutório deste capítulo).

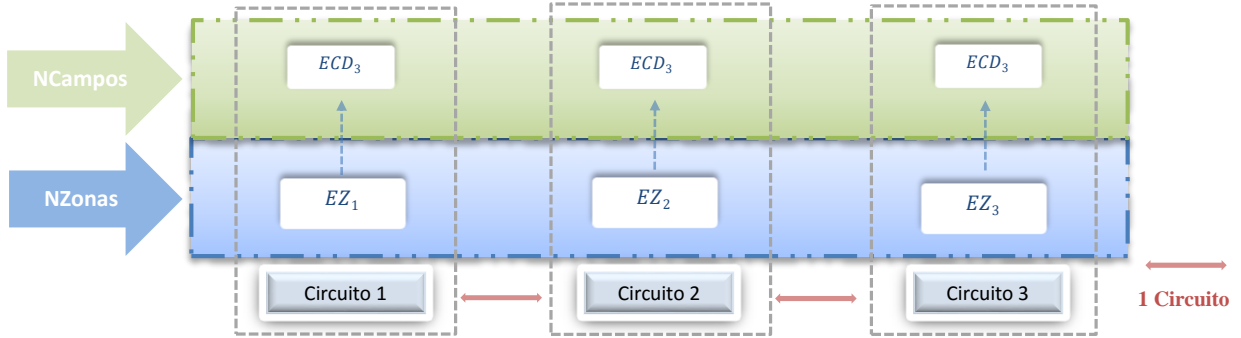


Figura 13 - Árvore de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos níveis de estrutura de zonas e de estrutura de campos.

(3) Nível de Estrutura de Alimentação

O *nível de estrutura de alimentação* é o terceiro nível a ser aplicado ao desenho ordenado de um circuito e produz a sua *estrutura de alimentação de solução*, é descrito por um subdomínio de parametrização, na forma matricial matriz-lista, dimensões $[1 \times 6]$, atribuído de seis parâmetros de ajuste-de-estrutura e dá pelo nome de *vetor de alimentação de solução*. Prevê variabilidade na atribuição, divergência do tipo V e *condicionalidade herdada* do *vetor de zonas*(de escoamento) e da *matriz de campos* (de desempenho) presentes na sua linha de desenho.

O subdomínio de parametrização a definir para o *nível de estrutura de alimentação* do circuito é o $S_{1,3}$ como segue.²²

$$S_{1,3} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\} \quad (14)$$

$x_1 = N^\circ$ cotas de produção	$x_5 = \text{alimentação}_{\text{circuito}}$
$x_2 = N^\circ$ redes de alimentação	$x_6 = \text{bombagem}_{\text{alimentação}}$
$x_3 = \text{distribuidores}_{\text{modelo (p/rede)}}$	$x_7 = \text{divisores}_{\text{caudal}}$
$x_4 = \text{distribuidores}_{\text{saída (p/dstrbdr)}}$	$x_8 = \text{condutores}_{\text{confinamento}_{\text{escoamento}}}$

O *vetor de alimentação de solução* resulta da aplicação do operador *matriz de parametrização* sobre o subdomínio de parametrização $S_{1,3}$ como definido para o *nível de estrutura de zonas*,

$$[\text{Vetor de Alimentação}_{\text{solução}}]: \text{Matriz}_{\text{parametrização}}(S_{1,3}) \quad (15)$$

,sendo a sua *matriz tipológica* (de parametrização) a que segue,

²² Este subdomínio de parametrização é desenvolvido aqui (*nível de estrutura de peças*), apesar de ser uma *estrutura de campos* (de desempenho), porque se quis que a sua aplicação de variabilidade (na atribuição) produzisse *estruturas de alimentação* que distassem de menos de um circuito entre si, i.e. com divergência do tipo V, o que só teria sido possível neste nível, visto que a atribuição no *nível de estrutura de campos* vem definida com variabilidade (na atribuição) do tipo M, i.e. igual a um circuito. Esta escolha foi portanto de natureza metodológica.

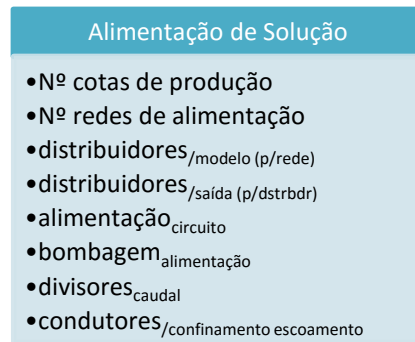


Figura 14 - Matriz tipológica de parametrização do vetor de alimentação, usada na caracterização do nível de estrutura de alimentação.

A matriz *vetor de alimentação de solução* desenvolve assim a *estrutura de alimentação* do circuito, nomeadamente a *fachada de alimentação*, mas sem entrar no detalhe das *peças*. Define igualmente aspetos básicos de desempenho da fachada. A tabela seguinte discute os *parâmetros-de-ajuste-de-estrutura*, da matriz-lista *vetor de alimentação de solução*, apresentados na figura 12.²³ Vários dos parâmetros de ajuste-de-estrutura vêm descritos na tabela associados a uma *matriz de subscritos de identidade (msi)*, que define relações de posição entre o elemento tratado no parâmetro e (vários) dos outros dos elementos da fachada.²⁴ Cada *índice* na matriz *msi* é um vetor de atribuição *numérica de inteiros* do qual fazemos o resumo no quadro seguinte.²⁵

Tabela 12 – Quadro-resumo dos subscritos de identidade utilizados na atribuição aos parâmetros da matriz *vetor de alimentação*.

Subscrito	Descrição
id_r	Identifica a ID da rede de alimentação
id_ce	Identifica a ID dos condutores de entrada de escoamento que ligam a um dado elemento tratado
id_cs	Identifica a ID dos condutores de saída de escoamento que ligam a um dado elemento tratado
id_dstr	Identifica a ID dos distribuidores de saída
id_bmb	Identifica a ID das bombas de alimentação

²³ Note-se que a matriz-lista *vetor de alimentação de solução* sofre de *condicionalidade intrínseca* e de *condicionalidade herdada*, esta última proveniente do *vetor de zonas* e da *matriz de campos de desempenho* que participem na sua linha de desenho.

²⁴ Esta relação de identidade/posição entre elementos da fachada é necessária para garantir que a atribuição da matriz de alimentação é capaz de produzir um esquema de fluxo de escoamento descritivo do escoamento estrutural nas redes da fachada de alimentação. Estes diagramas de fluxo são ilustrados junto das respetivas matrizes (de alimentação) atribuídas, tratadas neste capítulo.

²⁵ Diferentes parâmetros na matriz fazem uso de diferentes combinações destes índices na sua matriz de subscritos de identidade de acordo com o que faz sentido para caraterizar a natureza do elemento.

id_dvsr	Identifica a ID do(s) divisor(es) de caudal
id_trç	Identifica a ID de troço de condução ao qual um dado condutor tratado pertence
id_cndtr	Identifica a(s) ID do(s) condutor(es) definidos numa dada atribuição

Tabela 13 - Quadro-resumo dos parâmetros de ajuste constituintes do vetor campo de desempenho de alimentação da solução do nível de estrutura de alimentação do circuito.

Alimentação de Solução	○ N° cotas de produção [matriz de campos]	• /numérico,inteiro/--/--	Este parâmetro identifica o número de andares de produção presentes na zona de crescimento (zona2) do circuito.
	○ N° redes de alimentação	• /numérico,inteiro/--/--	Este parâmetro informa do número de redes de alimentação tomadas para a organização conceptual dos escoamentos (de solução) na fachada de alimentação.
	○ $distribuidores_{/tipo (p/rede)}^{26}$ [msi] = (id_r, id_ce, id_cs, id_dst)	• $pdp_{/string,discreta/--/--}$ • $wtrhldr_{/string,discreta/--/--}$ • $tubetree_{/string,discreta/--/--}$ • $bivalve_{/string,discreta/--/--}$	Este parâmetro é uma matriz que guarda a informação sobre a natureza dos distribuidores de saída que escoam em cada rede de alimentação da fachada.
	○ $distribuidores_{/saida (p/distribuidor)}$	• $simples_{/string,discreta/--/--}$ • $dupla_{/string,discreta/--/--}$	Este parâmetro guarda a informação para cada distribuidor de se os seus condutores de saída escoam cada um para uma cama de crescimento (<i>simples</i>), ou cada dois para uma cama de crescimento (<i>dupla</i>).
	○ $alimentação_{circuito}$ [msi] = (id_r, id_r_interlagadas)	• $independente_{/string,discreta/--/--}$ • $interligada_{/string,discreta/--/--}$	Este parâmetro informa, por rede de alimentação, se a alimentação dessa rede é realizada por alimentação <i>independente</i> ou se a rede <i>interliga</i> com outras redes da fachada. Adicionalmente diz quais são as redes interligadas entre si.

²⁶ Cada um dos tipos de distribuidor será desenvolvido durante a classificação de peças, na discussão da matriz de peças do nível de estrutura de peças.

<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>bombagem</i>_{alimentação} [msi] = (id_r, id_ce, id_cs, id_bmb) 	<ul style="list-style-type: none"> • /string,discreta/--/-- 	Indica de quantas bombas se compõe a alimentação (de solução) da fachada de alimentação e qual a identidade da(s) bombas associadas a cada rede de alimentação.
<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>divisores</i>_{caudal} [msi] = (id_r, id_ce, id_cs, id_dvsr) 	<ul style="list-style-type: none"> • /string,discreta/--/-- 	Este parâmetro informa de se existem divisores de caudal que operam na fachada de alimentação e quais redes de alimentação são afetadas por cada um.
<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>condutores</i>_{/confinamento escoamento} [msi] = (id_r, id_trc, id_cndtr) 	<ul style="list-style-type: none"> • mangueira/string,discreta/--/-- • placa/string,discreta/--/-- 	O parâmetro, <i>condutores</i> , informa para cada rede de alimentação, da respetiva sequência de <i>condutores de caudal</i> que se estabelece no percurso dos seus troços. Os escoamentos confinados são conduzidos ou por <i>mangueiras</i> ou <i>placas</i> de escoamento.

Aplicar de *variabilidade na atribuição* à matriz *vetor de alimentação de solução*, durante o desenho do circuito, produz *estruturas de alimentação de solução* para o circuito, que são diversas e podem ser divergentes, quer ao nível da versão quer ao nível do modelo, conforme o que o desenhador (do circuito) entender fazer na sua linha de desenho, seja ramificá-la, mantendo-a dentro do mesmo circuito, ou transferi-la integralmente para o domínio de um novo circuito.²⁷

O uso de versões nesta estrutura permite explorar de entre diversas opções de bombagem e distribuição de caudais na alimentação, introduzindo diferenças na qualidade dos escoamentos e nos consumos. Esta exploração mais detalhada da zona1 justifica-se pela enorme importância que esta detém na formação dos escoamentos na zona2, i.e. zona de crescimento das plantas – que é *senso lato* a zona mais importante do circuito.

Produzimos treze *estruturas de alimentação de solução* para distribuir pela árvore de desenho dos nossos circuitos de crescimento. A colocação na árvore de desenho, de cada uma estrutura produzida, deve respeitar a natureza das condicionalidades herdadas atinentes à *linha de desenho* onde a (dita cuja *estrutura de alimentação*) for colocada. Todas as matrizes de parametrização atribuídas, usadas na produção das nossas estruturas de alimentação, vem apresentadas nas figuras (), sendo acompanhadas pelo diagrama esquemático respetivo da *rede de alimentação*, e de uma legenda mais nota descritiva. Os diagramas esquemáticos para /das *redes de alimentação* devem ser lidos segundo a legenda de figura que segue.

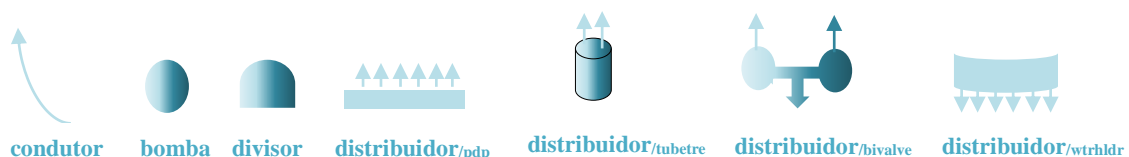


Figura 15 – Legenda dos elementos presentes nos diagramas esquemáticos das redes de alimentação de caudal da zona1, dos nossos circuitos.

²⁷ Sugere-se a consulta da árvore de desenho da figura27, para ver as linhas de desenho dos circuitos, já adicionadas das desejadas *estruturas de alimentação*.

O número de *redes de alimentação* que um dado elemento de fachada serve na sua operação, é identificado visualmente nos diagramas esquemáticos, pelo gradiente de cores que preenche o elemento. O número de tons coloridos (identificáveis) no elemento é equivalente ao número de *redes de alimentação* que o elemento serve durante a sua operação na fachada.

Cada matriz de parametrização atribuída, apresentada nas figuras, é nomeada por um descritivo que identifica não só a identidade da estrutura, mas qual a estrutura de campos (*ergo*, linha de desenho) que lhe precede (à qual pertence), e qual a quantidade e tipo dos principais componentes que a constituem, permitindo uma interpretação e reconstrução rápida da estrutura de alimentação que estamos a propor, uma vez que esta tenha sido já oportunamente apreciada e que tenha sido compreendida a relação atributiva entre as regras da tabela e a montagem diagramática das redes.

EA ₁ – LongStand/pdp(12)/1bmb,1dvsr,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 3 cotas • 3 redes de alimentação • (pdp_{1,2,5:16,1};pdp_{2,3,17:28,2};pdp_{3,4,29:40,3}) • (dupla, dupla, dupla) • (bomba_{1,0,1,1};bomba_{2,0,1,1};bomba_{3,0,1,1}) • (divisor_{1,1,2:4,1};divisor_{2,1,2:4,1};divisor_{3,1,2:4,1}) • (interligada₂₃;interligada₁₃;interligada₁₂) • (mangueira_{1,1,1};mangueira_{1,2,2};mangueira_{1,3,5-16}, mangueira_{2,1,1};mangueira_{2,2,3};mangueira_{2,3,17-28},

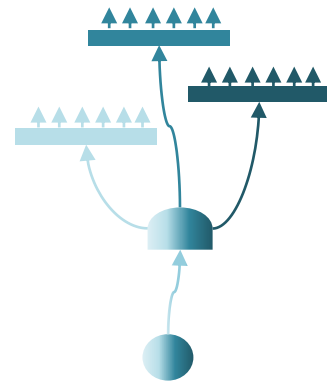


Figura 16 – Estrutura de alimentação (EA₁) com quadro de parâmetros. A estrutura é constituída por uma bomba que alimenta um divisor de caudal que divide para 3 distribuidores de caudal do tipo *pdp*, cada um com 12 saídas de alimentação, que estão agrupadas por alimentação dupla, e que escoam (separadamente) para as 6 calhas de crescimento de cada um dos (3) andares de produção (constituintes) da zona2 do circuito.

EA ₂ - LongStand/pdp(12)/3bmbs,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 3 cotas (de produção) • 3 redes (de alimentação) • (pdp_{1,41,44:55,4};pdp_{2,42,56:67,5};pdp_{3,43,68:79,6}) • (dupla, dupla, dupla) • (bomba_{1,0,41,2};bomba_{2,0,42,3};bomba_{3,0,43,4}) • (null; null; null) • (independente, independente, independente) • (mangueira_{1,1,41};mangueira_{1,2,44:55}, mangueira_{2,1,42};mangueira_{2,2,56:67}, mangueira_{3,1,43}; mangueira_{3,2,68:79})

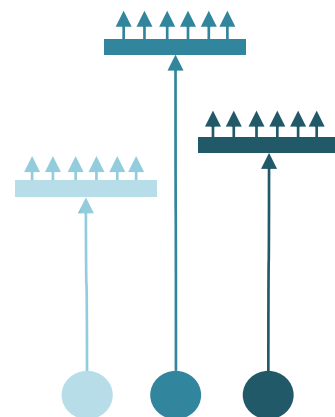


Figura 17 – Estrutura de alimentação (EA₂) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₂) é constituída por três bombas de alimentação, que alimentam em separado, 3 distribuidores de caudal do tipo *pdp*, cada qual atribuído a uma rede e cota de produção *independentes*. Prefeito de 12 saídas de alimentação de caudal, cada um, atribuídas em *alimentação dupla*, cada distribuidor procede, na saída da sua rede, à alimentação das 6 calhas de crescimento que constituem o seu andar de produção atinente (em zona2).

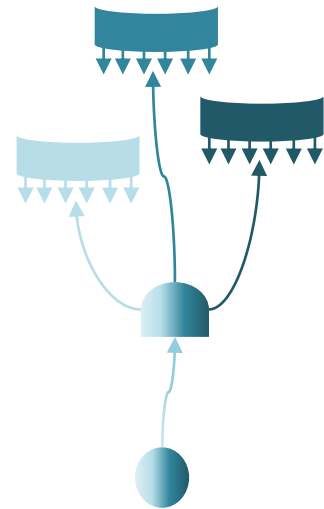
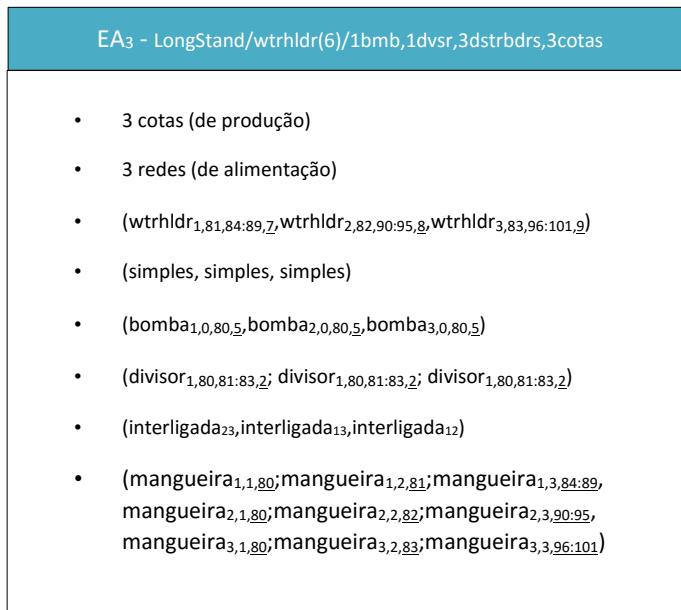


Figura 18 - Estrutura de alimentação (EA₃) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₃) é constituída por uma bomba que alimenta um divisor de caudal que divide para 3 distribuidores de caudal do tipo *wtrhldr*, cada um com 6 saídas de alimentação, que estão agrupadas por alimentação *simples*, e que escoam (separadamente) para as 6 calhas de crescimento que cada um dos (3) andares de produção (constituintes) da zona2, do circuito, possui.

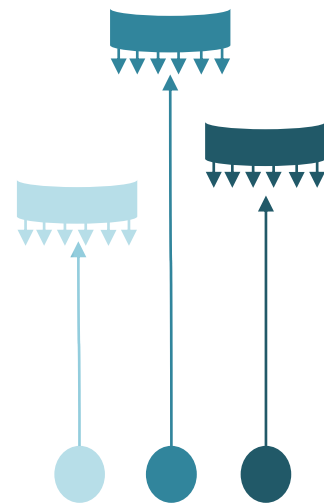


Figura 19 - Estrutura de alimentação (EA₄) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₄) é constituída por três bombas de alimentação, que alimentam em separado, 3 distribuidores de caudal do tipo *wtrhldr*, cada qual atribuído a uma rede de alimentação e cota de produção *independentes*. Prefeitos de 12 saídas de alimentação de caudal, cada um, atribuídas em *alimentação dupla*, cada distribuidor procede, na saída da sua rede, à alimentação das 6 calhas de crescimento que constituem o seu andar de produção atinente (em zona2).

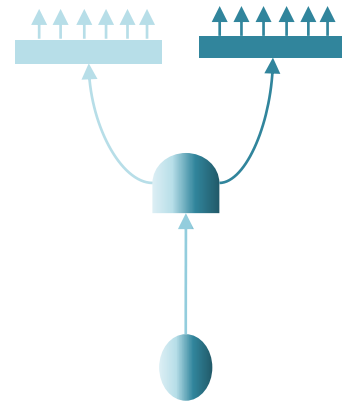


Figura 21 - Estrutura de alimentação (EA₅) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₅) é constituída por uma bomba que alimenta um divisor de caudal que divide para 2 distribuidores de caudal do tipo pdp, cada um com 9 saídas de alimentação, que estão agrupadas por alimentação simples, e que escoam (separadamente) para as 9 calhas de crescimento que cada metade do prisma triangular da zona2 do circuito alimenta.

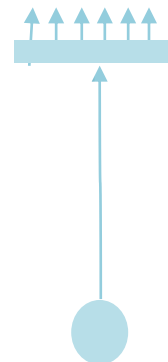
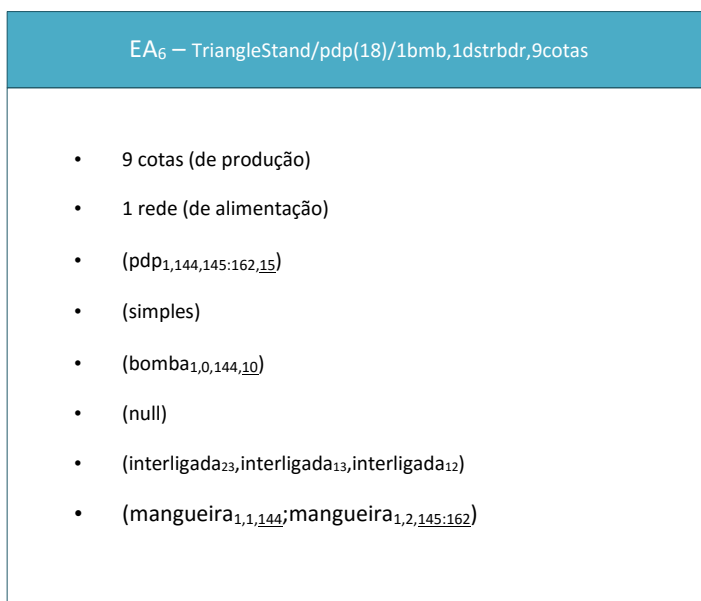


Figura 22 - Estrutura de alimentação (EA₆) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₆) é constituída por uma bomba de alimentação, que alimenta um distribuidor de caudal do tipo pdp. Este, prefeito de 18 saídas de alimentação de caudal, atribuídas em alimentação simples, procede, na sua saída de rede, à alimentação de 18 calhas de crescimento que constituem a bancada de crescimento (em zona2).

EA ₇ – TriangleStand/pdp(9)/2bmbs,2dstrbdrs,9cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 9 cotas (de produção) • 2 redes (de alimentação) • (pdp_{1,163,165:173,16},pdp_{2,174,174:182,17}) • (simples, simples) • (bomba_{1,0,163,11}, bomba_{2,0,164,12}) • (null,null) • (independente, independente) • (mangueira_{1,1,163};mangueira_{1,2,165:173}, mangueira_{2,1,164};mangueira_{2,2,174:182})

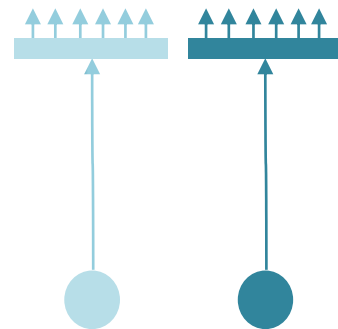


Figura 23 - Estrutura de alimentação (EA₇) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₇) é constituída por duas bombas de alimentação, que alimentam em separado, 2 distribuidores de caudal do tipo *pdp*, cada qual atribuído a uma rede e cota de produção *independentes*. Cada distribuidor é feito de 9 saídas de alimentação de caudal, atribuídas em alimentação *simples*, que distribuem, à saída da (sua) rede de alimentação, solução nutritiva para um conjunto de 9 calhas de crescimento que constituem cada uma das metades do prisma triangular da face de alimentação da zona2 do seu circuito.

EA ₈ – TriangleStand/bivalve(18)/ 1bmb,1dstrbdr,9cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 9 cotas • 2 redes • (bivalve_{1,183,184:201,18}) • (simples) • (bomba_{1,0,165,13}) • (null,null) • (interligada₂, interligada₁) • (mangueira_{1,1,183};mangueira_{1,2,184:201})

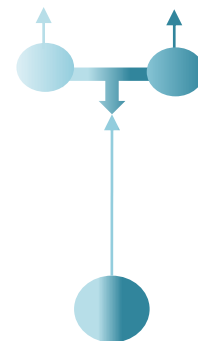


Figura 24 - Estrutura de alimentação (EA₈) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₈) é constituída por uma bomba de alimentação, que alimenta um distribuidor de caudal do tipo *bivalve*. Este, feito de 18 saídas, 9 em cada válvula, que operam simultaneamente em alimentação *simples*, procede, à alimentação de (9+9) calhas de crescimento constituintes de cada uma das metades do prisma triangular da face de alimentação da zona2 do circuito respetivo.

EA ₉ – TriangleStand/tubetree(18)/1bmb,1dstrbdr,9cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 9 cotas (de produção) • 2 redes (de alimentação) • (tubetree_{1,202,203:20,19}) • (simples) • (bomba_{1,0,202,14}) • (null,null) • (independente, independente) • (mangueira_{1,1,202,mangueira_{1,2,203:220}})



Figura 25 - Estrutura de alimentação (EA₉) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₉) é constituída por uma bomba de alimentação, que alimenta um distribuidor de caudal do tipo *tubetree*. Este, prefeito de 18 saídas que operam simultaneamente em alimentação *simples*, procede à alimentação de 18 calhas de crescimento à saída da rede de alimentação, que comprazem a entrada na zona2 (de crescimento) do circuito.

EA ₁₀ - SinglePond/pdp(24)/1bmb,1dvsr,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> • 3 cotas (de produção) • 3 redes (de alimentação) • (pdp_{1,222,225:248,20,pdp_{2,223,249:272,21,pdp_{3,224,273:297,22}})} • (dupla, dupla, dupla) • (bomba_{1,0,221,15}) • (divisor_{1,221,222:224,4,divisor_{1,221,222:224,4,divisor_{1,221,222:224,4}})} • (interligada_{23,interligada_{13,interligada₁₂})} • (mangueira_{1,1,221,mangueira_{1,2,222,mangueira_{1,3,225:248,mangueira_{2,1,221,mangueira_{2,2,223,mangueira_{2,3,249:272,mangueira_{3,1,221,mangueira_{3,2,224,mangueira_{3,3,273:297}}}}}}}}}

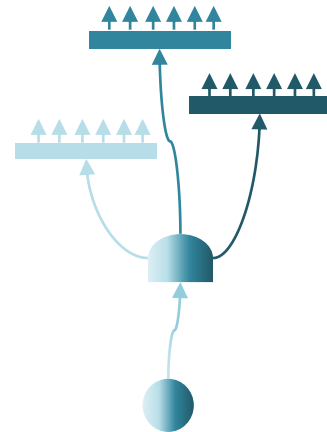


Figura 26 - Estrutura de alimentação (EA₁₀) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₁₀) é constituída por uma bomba que alimenta um divisor de caudal que divide para 3 distribuidores de caudal do tipo *pdp*, cada um com 24 saídas de alimentação, que estão agrupadas por alimentação *dupla*, e que escoam para 12 calhas de crescimento em cada um dos (3) andares de produção (constituintes) da zona2 do circuito.

EA ₁₁ — SinglePond/pdp(24)/3bmbs,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> 3 cotas (de produção) 3 redes (de alimentação) (pdp_{1,298,301:324,23};pdp_{2,299,325:348,24};pdp_{3,300,349:372,25}) (dupla,dupla,dupla) (bomba_{1,0,298,16};bomba_{2,0,299,17};bomba_{3,0,300,18}) (null;null;null) (independente, independente, independente) (mangueira_{1,1,298};mangueira_{1,2,301:324}, mangueira_{2,1,299};mangueira_{2,2,325:348}, mangueira_{3,1,300}; mangueira_{3,2,349:372})

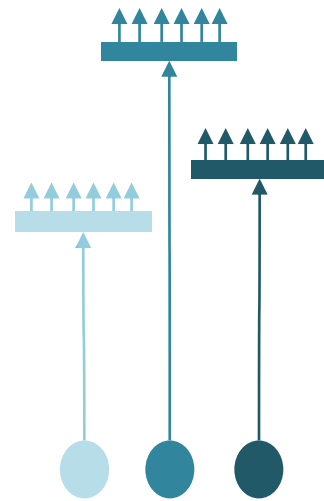


Figura 27 - Estrutura de alimentação (EA₁₁) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₁₁) é constituída por três bombas de alimentação, que alimentam em separado, 3 distribuidores de caudal do tipo *pdp*, cada qual atribuído a uma rede e cota de produção *independentes*. Prefeitos de 24 saídas de alimentação de caudal - atribuídas em *alimentação dupla* - cada um distribuidor de caudal procede, na saída da sua rede, à alimentação de 12 calhas de crescimento, que constituem o

EA ₁₂ — SinglePond/wtrhldr(12)/1bmb,1dvrs,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> 3 cotas (de produção) 3 redes (de alimentação) (wtrhldr_{1,374,377:388,26};wtrhldr_{2,375,389:400,27};wtrhldr_{3,376,401:412,28}) (simples,simples,simples) (bomba_{1,0,374,19};bomba_{2,0,375,19};bomba_{3,0,376,19}) (divisor_{1,373,374:376,5};divisor_{1,373,374:376,5};divisor_{1,373,374:376,5}) (interligada₂₃;interligada₁₃;interligada₁₂) (mangueira_{1,1,373};mangueira_{1,2,374};mangueira_{1,3,377:388}, mangueira_{2,1,373};mangueira_{2,2,375};mangueira_{2,3,389:400}, mangueira_{3,1,373};mangueira_{3,2,376};mangueira_{3,3,401:412})

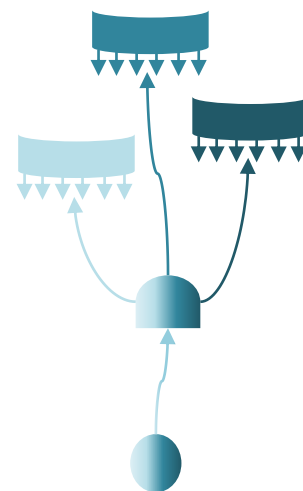


Figura 28 - Estrutura de alimentação (EA₁₂) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₁₂) é constituída por uma bomba que alimenta um divisor de caudal que divide para 3 distribuidores de caudal do tipo *wtrhldr*, cada um com 12 saídas de alimentação, agrupadas por *alimentação simples*, e que escoam em separado para 12 calhas de crescimento que constituem cada um dos (3) andares de produção da zona2 do circuito.

EA ₁₃ - SinglePond/wtrhldr(12)/3bmbs,3dstrbdrs,3cotas
<ul style="list-style-type: none"> 3 cotas 3 redes (wtrhldr_{1,413,416:427,29},wtrhldr_{2,414,428:439,30},wtrhldr_{3,415,440:451,31}) (simples,simples,simples) (bomba_{1,0,413,20},bomba_{2,0,414,21},bomba_{3,0,415,22}) (null, null, null) (independente, independente, independente) (mangueira_{1,1,413};mangueira_{1,2,416:427}, mangueira_{2,1,414};mangueira_{2,2,428:439}, mangueira_{3,1,415}; mangueira_{3,2,440:451})

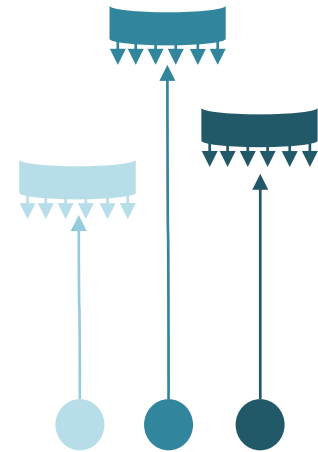


Figura 29 - Estrutura de alimentação (EA₁₃) com quadro de parâmetros. A estrutura de alimentação (EA₁₃) é constituída por três bombas de alimentação, que alimentam em separado, 3 distribuidores de caudal do tipo *wtrhldr*, cada qual atribuído a uma rede de alimentação e cota de produção *independentes*. Cada distribuidor tem 12 saídas de caudal, em regime de *alimentação simples*, que alimentam à saída da sua rede respetiva, 12 calhas de crescimento subordinadas a um andar de

Em resumo, apresentamos na tabela seguinte a listagem de todas as *estruturas de alimentação* que foram descritas, usando a mesma nomenclatura e classificação empregue nas tabelas de parametrização das figuras prévias.

Tabela 14 - Listagem descritiva das estruturas de alimentação produzidas e estudadas no presente trabalho.

Matriz de Campos de Desempenho (atribuída)	Elementos-chave de cada estrutura de alimentação atribuída		Identidade da estrutura
	distribuidor	elementos da fachada	
LongStand	pdp	1 bomba, 1 dvsr, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₁
		3 bombas, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₂
	wtrhldr	1 bomba, 1 dvsr, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₃
		3 bombas, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₄
TriangleStand	pdp	1 bomba, 1 dvsr, 2 dstrbdrs, 9 cotas	EA ₅
		1 bomba, 1 dstrbdr, 9 cotas	EA ₆
		2 bombas, 2 dstrbdrs, 9 cotas	EA ₇
	bivalve	1 bomba, 1 dstrbdr, 9 cotas	EA ₈
	tubetree	1 bomba, 1 dstrbdr, 9 cotas	EA ₉
SinglePond	pdp	1 bomba, 1 dvsr, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₁₀
		3 bombas, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₁₁
	wtrhldr	1 bomba, 1 dvsr, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₁₂
		3 bomba, 3 dstrbdrs, 3 cotas	EA ₁₃

Para terminar o ponto corrente, apresentamos a (nossa) já conhecida *árvore de desenho de estrutura dos circuitos*, acrescentada do correto preenchimento estrutural no seu nível (*de estrutura*) de *alimentação de solução*, o que se consegue pela atribuição de *estruturas de alimentação de solução*, (no caso as que foram produzidas no decorrer deste capítulo), às adequadas linhas de desenho de estrutura disponíveis nos correntemente produzidos desenhos de estruturas de circuitos. Deve-se garantir sempre a compatibilidade das *condicionalidades herdadas* entre as estruturas ligadas às linhas de desenho.

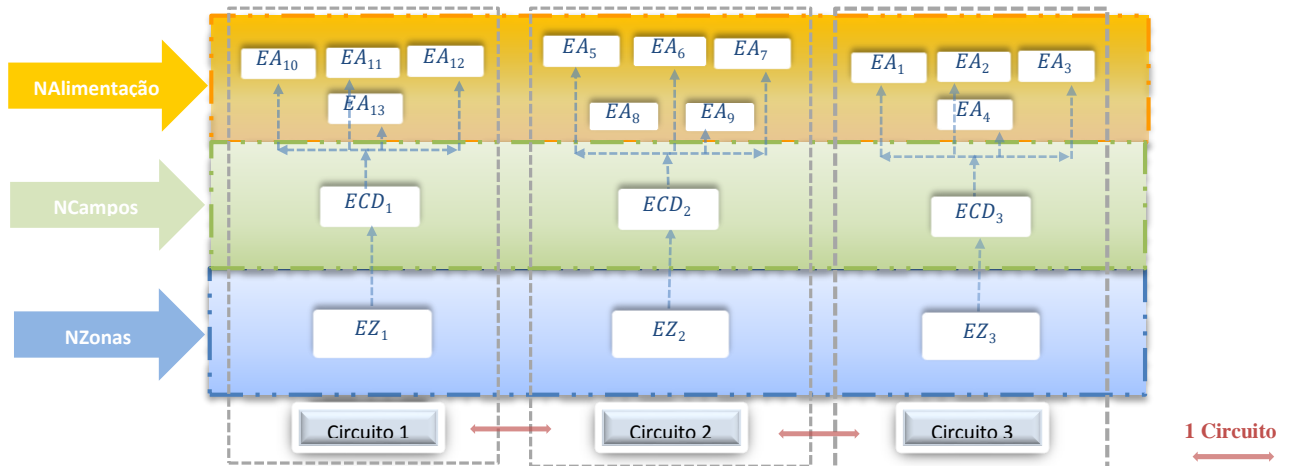


Figura 30 - Árvore de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos níveis de estrutura de zonas, estrutura de campos e estrutura de alimentação.

(4) Nível de Estrutura de Peças

O *nível de estrutura de peças* é o quarto nível a ser aplicado ao desenho ordenado de estrutura de um circuito e produz a sua *estrutura de peças*, é descrito por um subdomínio de parametrização, na forma matricial matriz-lista, dimensões [10x5], atribuído de quarenta e dois parâmetros de ajuste-de-estrutura, e que dá pelo nome de *matriz de peças*. Prevê variabilidade na atribuição e divergência do tipo V e sofre de *condicionalidade herdada* por parte das *estrutura de zonas*, *estrutura de campos* e *estrutura de alimentação de solução* que prefaçam a sua linha de desenho.

O *nível de estrutura de peças* arremata efetivamente o preenchimento da *estrutura de zonas*, da *estrutura de campos* (*de desempenho*) e da *estrutura de alimentação de solução* do circuito e detalha as suas *características de aparelhagem e dimensionamento* de todos (os seus) *elementos de estrutura*.²⁸

O *subdomínio de parametrização*, $S_{1,4}$, a definir para o *nível de estrutura de peças* da estrutura do circuito, é definido como segue,

²⁸ Quando tal aplicação é feita, estes elementos ficam adicionalmente conhecidos pela sua identidade de *peças*.

$$S_{1,4} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{17} & x_{18} & x_{19} & x_{20} & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{25} & x_{26} & x_{27} & x_{28} & x_{29} & x_{30} & x_{31} & x_{32} \\ x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} & x_{37} & x_{38} & x_{39} & x_{40} \\ x_{41} & x_{42} & & & & & & \end{pmatrix} \quad (16)$$

$x_1 = \text{Tipo}_{(dpst)}$	$x_{12} = \emptyset_{saídas} (dstrbdr)$	$x_{23} = \emptyset_{canais} (dvstr)$	$x_{34} = N^o_{canais} (cltr)$
$x_2 = \text{Geometria Base}_{(dpst)}$	$x_{13} = N^o_{canais} (dstrbdr)$	$x_{24} = \text{Espessura}_{(dvstr)}$	$x_{35} = \emptyset_{canais} (cltr)$
$x_3 = H_{(dpst)}$	$x_{14} = \emptyset_{canais} (dstrbdr)$	$x_{25} = C_{máx} (dvstr)$	$x_{36} = N^o_{entradas} (cltr)$
$x_4 = L_{máx} (dpst)$	$x_{15} = \text{Espessura}_{(dstrbdr)}$	$x_{26} = \text{Tipo}_{(cndtr)}$	$x_{37} = N^o_{saídas} (cltr)$
$x_5 = C_{máx} (dpst)$	$x_{16} = C_{máx} (dstrbdr)$	$x_{27} = \text{Geometria Base}_{(cndtr)}$	$x_{38} = \emptyset_{entradas} (cltr)$
$x_6 = A_{chão ocupada} (dpst)$	$x_{17} = \text{Geometria Base}_{(dvstr)}$	$x_{28} = N^o_{canais} (cndtr)$	$x_{39} = \emptyset_{saídas} (cltr)$
$x_7 = \text{Tipo}_{(dstrbdr)}$	$x_{18} = N^o_{entradas} (dvstr)$	$x_{29} = \emptyset_{canais} (cndtr)$	$x_{40} = \text{Espessura}_{(cltr)}$
$x_8 = \text{Geometria Base}_{(dstrbdr)}$	$x_{19} = N^o_{saídas} (dvstr)$	$x_{30} = \text{Espessura}_{(cndtr)}$	$x_{41} = C_{máx} (cltr)$
$x_9 = N^o_{entradas} (dstrbdr)$	$x_{20} = \emptyset_{entradas} (dvstr)$	$x_{31} = C_{máx} (cndtr)$	$x_{42} = L_{máx} (cltr)$
$x_{10} = N^o_{saídas} (dstrbdr)$	$x_{21} = \emptyset_{saídas} (dvstr)$	$x_{32} = L_{máx} (cndtr)$	
$x_{11} = \emptyset_{entradas} (dstrbdr)$	$x_{22} = N^o_{canais} (dvstr)$	$x_{33} = \text{Geometria Base}_{(cltr)}$	A

A *matriz de estrutura de peças* resulta da aplicação do operador *matriz de parametrização* sobre o subdomínio de parametrização $S_{1,4}$ como o definimos para o nível de estrutura de zonas,

$$[\text{Matriz de Estrutura de Peças}]: \text{Matriz}_{\text{Parametrização}}(S_{1,4}) \quad (17)$$

A *matriz de estrutura de peças* desenvolve em detalhe sobre as características de *aparelhagem e dimensionamento dos elementos de estrutura* do circuito, (quer daqueles introduzidos já em níveis prévios do desenho de estrutura, quer dos introduzidos contemporaneamente ao nível de estrutura de peças). Desta forma, a *matriz de peças*, que é a quarta estrutura de parametrização a ser aplicada ao desenho ordenado de estrutura de um circuito, sofre de *condicionalidade intrínseca* e de *condicionalidade herdada* – esta última provinda do *vetor de zonas, matriz de campos(de desempenho)* e *matriz de alimentação(de solução)* que tomam parte na (sua) linha de desenho, i.e. (onde a respetiva *matriz de peças* venha a ser definida). Um dos resultados que merece mais destaque, resultante desta *condicionalidade herdada*, é o de fixar os *tipos(categorias)* de peças presentes no circuito, a que zonas pertencem, em que quantidade as peças estão pesentes i.e. o *número de peças*, as suas identidades e o *tipo de peça*.

	Zona1				
	Depósitos	Distribuidores	Divisores	Condutores	Bombas
Categoria da peça	(tanque, ind.co)	(pdp, wtrhldr, tubetree, bivalve)	--	mangueira	bombas
Tipo de peças	(4,9)	(17,12,1,1)	5	451	13
Nº de peças	(1:4,5:13)	([1:6;13:17;20:25], [7:12; 26:31], 19, 18)	(1:5)	(1:451)	(1:13)
ID das peças					

	Zona2	Zona3				Zona4
Categoria da peça	Condutores	Depósitos	Condutores	Coletores	Bombas	Condutores
Tipo de peças	calha	(tanque, ind.co)	calha	--	--	mangueira
Nº de peças	450	(4,9)	24	18	9	9
ID das peças	(452:900)	(1:4,14:22)	(901:924)	(1:18)	(13:21)	(925:933)

Figura 31 – Parâmetros importantes da estrutura de peças que vem fixos por condicionalidade herdada dos níveis de estrutura (de circuito) anteriores.

Apresentamos em seguida a *matriz tipológica de parametrização de peças* como foi definida para o nosso trabalho, seguida da tabela que discute em detalhe cada um dos seus *parâmetros-de-ajuste-de-estrutura*.

Depósito	Distribuidor	Divisor	Condutor	Coletor
<ul style="list-style-type: none"> •Tipo •Geometria base •H_{depósito} •L_{máx} •C_{máx} •Área_{chão ocupada} 	<ul style="list-style-type: none"> •Tipo •Geometria base •Nº_{entradas} •Nº_{saídas} •L_{entrada} •L_{saídas} •Nº_{canais} •L_{canais} •Espessura •C_{máx} •L_{máx} 	<ul style="list-style-type: none"> •Geometria base •Nº_{entradas} •Nº_{saídas} •L_{entrada} •L_{saídas} •Nº_{canais} •L_{canais} •Espessura •C_{máx} •L_{máx} 	<ul style="list-style-type: none"> •Tipo •Geometria base •Nº_{canais} •L_{canais} •Espessura •C_{máx} •L_{máx} 	<ul style="list-style-type: none"> •Geometria base •Nº_{entradas} •Nº_{saídas} •L_{entradas} •L_{saídas} •Nº_{canais} •L_{canais} •Espessura •C_{máx} •L_{máx}

Figura 32 - Matriz tipológica de parametrização de peças usada na caracterização do nível de estrutura de peças.

Note-se que a categoria *Bombas* possui *condicionalidade herdada* ao nível da identidade, número mínimo de peças e das zonas às quais pertencem, mas não é fixa de número máximo de peças, nem a sua parametrização merece destaque ao nível da *peça*, dado que a atribuição aos circuitos é feita mediante catálogo do fabricante, o que imprime às peças (imediatamente) as suas características estruturais, dispensando a necessidade de caracterização por parte do desenhador.

Tabela 15 - Quadro-resumo dos parâmetros de ajuste constituintes da matriz de parametrização de peças do nível de estrutura de peças do circuito.

Depósito	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Tipo</i>_(dpst) <p>vetor de zonas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>único_simples</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>único_tanque</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>independentes com.</i>_{/string,discreta/--/--} 	<p>A variável <i>depósitos</i> pode tomar os valores <i>único_simples</i>, <i>único_tanque</i> ou, <i>independentes comunicantes</i>. Informa de se existe um único depósito no circuito, caso em que funciona como alimentação e coleção, ou, se existem depósitos independentes comunicantes, um para a alimentação e outro para coleção.</p>
----------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Geometria Base</i>_(dpst) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/string,discreta/--/--</i> <ul style="list-style-type: none"> ○ e.g. cilíndrica, cúbica 	<p>Este <i>parâmetro</i> informa do <u>sólido geométricos a três dimensões</u> que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões de cada um dos <u>depósitos de solução</u> tratados no conjunto (de todas as estruturas de alimentação e coleção produzidas para o estudo) dos nossos circuitos.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>H</i>_(dpst) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/numérico,decimal/L/m</i> 	<p>Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>altura</u> definida para o conjunto dos pontos do depósito tratado. É a medida de entre os pontos mais afastados da dimensão <u>vertical</u> da peça.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>L_{máx}</i> (dpst) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/numérico,decimal/L/m</i> 	<p>Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>largura</u> definida para o conjunto dos pontos de um dado depósito tratado no circuito. É a medida de entre os pontos mais afastados da dimensão <u>horizontal</u> da peça.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>C_{máx}</i> (dpst) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/numérico,decimal/L/m</i> 	<p>Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo do <u>comprimento</u> definido para o conjunto dos pontos de um dado depósito tratado no circuito. É a medida de entre os pontos mais afastados da dimensão <u>longitudinal</u> da peça.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Área_{chão ocupada}</i> (dpst) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>/numérico,decimal/L²/m²</i> 	<p>Este <i>parâmetro</i> define o valor da área de chão ocupada pela projecção da base do depósito tratado sobre a superfície onde se apoia. Este valor não respeita a áreas sombreadas produzidas pelo depósito.</p>
Distribuidor	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Tipo</i>_(dstrbdr) <div>matriz de alimentação de solução</div>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>pdp</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>wtrhldr</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>tubetree</i>_{/string,discreta/--/--} • <i>bivalve</i>_{/string,discreta/--/--} 	<p>Este <i>parâmetro</i> é uma matriz que guarda informação sobre os <i>distribuidores</i> de caudal presentes em cada uma das <i>redes de alimentação de solução</i> definidas para uso na fachada (de alimentação) de qualquer <i>estrutura de alimentação</i> produzida a estudo no desenho dos nossos circuitos.</p>

○ <i>Geometria Base</i> _(dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /string,discreta/--/-- • e.g. cilíndrica, cúbica 	Este <i>parâmetro</i> informa do <u>sólido geométricos a três dimensões</u> que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões de cada um dos <u>distribuidores de solução</u> tratados no conjunto (de todas as estruturas de alimentação produzidas para o estudo) dos nossos circuitos.
○ <i>N^oentradas</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,inteiro/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> informa do número de <u>entradas de caudal</u> que estão definidas para/em cada distribuidor tratado.
○ <i>N^osaídas</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,inteiro/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> informa do <u>número de saídas</u> de caudal que estão definidas para/em cada distribuidor tratado.
○ <i>Ø_{entradas}</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,decimal/L/m 	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro interno de escoamento que vem definido para cada uma das <u>entradas de caudal</u> produzidas em cada <u>distribuidor de caudal</u> produzido para se constituir a desenho e a estudo, nos nossos circuitos.
○ <i>Ø_{saídas}</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,decimal/L/m 	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro interno de escoamento que vem definido para cada uma das <u>saídas de caudal</u> produzidas em cada <u>distribuidor de caudal</u> produzido para se constituir a desenho e a estudo, nos nossos circuitos.
○ <i>N^ocanais</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,inteiro/--/-- 	Este <i>parâmetro</i> informa do número de total de <u>canais interiores de escoamento</u> por onde se desenvolve escoamento de caudal em cada um dos <u>distribuidores</u> tratados.
○ <i>Ø_{canais}</i> (dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,decimal/L/m 	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro de escoamento dos canais interiores de escoamento por onde se processa o escoamento de caudal em/para cada distribuidor.
○ <i>Espessura</i> _(dstrbdr)	<ul style="list-style-type: none"> • /númeroico,decimal/L/m 	Este <i>parâmetro</i> informa da espessura da superfície exterior de contorno <u>de cada um dos nossos distribuidores de caudal produzidos</u> .

	○ $C_{\text{máx}} (dstrbdr)$	• $/\text{númeroico,decimal/L/m}$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo do <u>comprimento</u> definido para (o conjunto dos pontos de) cada um dos distribuidores produzidos para os circuitos. É a medida d'entre os pontos mais afastados da dimensão <u>longitudinal</u> de cada peça tratada.
	○ $L_{\text{máx}} (dstrbdr)$	• $/\text{númeroico,decimal/L/m}$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>largura</u> definida para o conjunto dos pontos de cada um dos <u>distribuidores</u> produzidos nos nossos circuitos. É a medida de entre os pontos mais afastados da dimensão <u>horizontal</u> da peça.
Divisor	○ $Geometria\ Base_{(dvsr)}$	• $/\text{string,discreta/--/--}$ • e.g. cilíndrica, cúbica	Este <i>parâmetro</i> informa do <u>sólido geométricos a três dimensões</u> que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões de cada um dos <u>divisores de solução</u> tratados no conjunto (de todas as estruturas de alimentação produzidas para o estudo) dos nossos circuitos.
	○ $N^{\circ}_{\text{entradas}} (dvsr)$	• $/\text{númeroico,inteiro/--/--}$	Este <i>parâmetro</i> informa do número de <u>entradas de caudal</u> que vem definidas para cada <u>divisor</u> tratado.
	○ $N^{\circ}_{\text{saídas}} (dvsr)$	• $/\text{númeroico,inteiro/--/--}$	Este <i>parâmetro</i> informa do número de <u>saídas de caudal</u> que vem definidas para cada <u>divisor</u> tratado.
	○ $L_{\text{entradas}} (dvsr)$	• $/\text{númeroico,decimal/L/m}$	Este <i>parâmetro</i> informa da largura de escoamento de cada uma das <u>entradas</u> de escoamento definidas em/para cada um dos divisores de caudal constituídos a estudo durante o/no desenho dos (nossos) circuitos.
	○ $L_{\text{saídas}}(dvsr)$	• $/\text{númeroico,decimal/L/m}$	Este <i>parâmetro</i> informa da largura de escoamento de cada uma das <u>saídas</u> de escoamento definidas em/para cada um dos divisores de caudal constituídos a estudo no/durante o desenho dos (nossos) circuitos.

	○ $N_{\text{canais}}^{\text{dvsr}}$	• $/\text{número, inteiro}/--/--$	Este <i>parâmetro</i> informa do número de total de <u>canais interiores de escoamento</u> por onde se desenvolve escoamento de caudal em cada um dos <u>divisores</u> tratados.
	○ $L_{\text{canais}}^{\text{dvsr}}$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro de escoamento dos canais interiores de escoamento por onde se processa o escoamento de caudal em cada <u>divisor</u> .
	○ $\text{Espessura}_{\text{dvsr}}$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa da espessura da superfície exterior de contorno de <u>cada um dos nossos divisores de caudal produzidos</u> .
	○ $C_{\text{máx}}^{\text{dvsr}}$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo do <u>comprimento</u> definido para o conjunto dos pontos de cada <u>divisor</u> produzido para os circuitos. É a medida d'entre os pontos mais afastados da dimensão <u>longitudinal</u> da peça.
	○ $L_{\text{máx}}^{\text{dvsr}}$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>largura</u> definida para o conjunto dos pontos de cada um dos <u>divisores</u> produzidos para os/nossos circuitos. É a medida de entre os pontos mais afastados da dimensão <u>horizontal</u> da peça.
Condutor	○ $\text{Tipo}_{\text{cndtr}}$ <div>matriz de alimentação de solução</div>	• $\text{mangueira}/\text{string, discreta}/--/--$ • $\text{placa}/\text{string, discreta}/--/--$	Este <i>parâmetro</i> é uma matriz que guarda informação sobre os <u>condutores</u> de caudal presentes em cada uma das <u>redes de alimentação de solução</u> definidas para uso na fachada (de alimentação) de qualquer <u>estrutura de alimentação</u> produzida a estudo no desenho dos nossos circuitos.
	○ $\text{Geometria Base}_{\text{cndtr}}$	• $/\text{string, discreta}/--/--$ • <i>e.g. cilíndrica, cúbica</i>	Este <i>parâmetro</i> informa do <u>sólido geométricos a três dimensões</u> que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões de cada um dos <u>condutores de solução</u> tratados no conjunto (de todas as estruturas de alimentação produzidas para o estudo) dos nossos circuitos.

	○ $N^{\circ}_{\text{canais}} (cndtr)$	• $/\text{número, inteiro}/--/--$	Este <i>parâmetro</i> informa do número total de <u>canais interiores de escoamento</u> por onde se desenvolve o escoamento de caudal, para/em cada um dos <u>condutores de solução</u> desenvolvidos para o escoamento nos/dos nossos circuitos.
	○ $L_{\text{canais}} (cndtr)$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa da largura interior de cada <u>condutor</u> definido a estudo, durante o estudo dos circuitos.
	○ $Espessura_{(cndtr)}$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa da espessura da superfície exterior de contorno de <u>cada um dos nossos condutores de caudal produzidos</u> .
	○ $C_{\text{máx}} (cndtr)$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo do <u>comprimento</u> definido para o conjunto dos pontos de cada <u>condutor</u> produzido para os circuitos. É a medida d'entre os pontos mais afastados da dimensão <u>longitudinal</u> da peça, quando em máxima extensão.
	○ $L_{\text{máx}} (cndtr)$	• $/\text{número, decimal}/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>largura</u> definida para o conjunto dos pontos de cada um dos <u>condutores</u> produzidos para o/no conjunto dos nossos circuitos. É a medida de entre os pontos mais afastados na dimensão <u>horizontal</u> de cada peça.
Coletor	○ $Geometria\ Base_{(cltr)}$	• $/\text{string, discreta}/--/--$ • <i>e.g. cilíndrica, cúbica</i>	Este <i>parâmetro</i> informa do <u>sólido geométricos a três dimensões</u> que mais se aproxima da forma geométrica a três dimensões de cada um dos <u>coletores de solução</u> tratados no conjunto (de todas as estruturas de coleção produzidas para o estudo) dos nossos circuitos.
	○ $N^{\circ}_{\text{entradas}} (cltr)$	• $/\text{número, inteiro}/--/--$	Este <i>parâmetro</i> informa do número de <u>entradas de caudal</u> que vem definidas para cada <u>coletor</u> tratado, no conjunto de todas as estruturas de coleção produzidas para o total/conjunto dos nossos circuitos.

○ $N_{saídas}^{o} (cltr)$	• $/número, inteiro/--/--$	Este <i>parâmetro</i> informa do número de <u>saídas de caudal</u> que vêm definidas para cada <u>coletor</u> tratado, no conjunto de todas as estruturas de coleção produzidas para o total/conjunto dos nossos circuitos.
○ $L_{entradas} (cltr)$	• $/número, decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro interno de escoamento que vem definido para cada uma das <u>entradas de caudal</u> atribuídas a cada <u>divisor de caudal</u> produzido a estudo no/durante/para o desenho dos nossos circuitos.
○ $L_{saídas} (cltr)$	• $/número, decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa do diâmetro interno de escoamento que vem definido para cada uma das <u>saídas de caudal</u> atribuídas a cada <u>divisor de caudal</u> produzido a estudo no/durante/para o desenho dos nossos circuitos.
○ $N_{canais}^{o} (cltr)$	• $/número, inteiro/--/--$	Este <i>parâmetro</i> informa do número total de <u>canais interiores de escoamento</u> por onde se desenvolve escoamento de caudal, para/em cada um dos <u>coletores de solução</u> (desenvolvidos para o escoamento) nos/dos nossos circuitos.
○ $L_{canais} (cltr)$	• $/número, decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa da largura interior de cada <u>coletor</u> definido a estudo, durante o estudo dos circuitos.
○ $Espessura_{(cltr)}$	• $/número, decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> informa da espessura da superfície exterior de contorno <u>de cada um dos coletores de caudal produzidos</u> , para o/no/durante o estudo dos nossos circuitos.
○ $C_{máx} (cltr)$	• $/número, decimal/L/m$	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo do <u>comprimento</u> definido para o conjunto dos pontos de cada um dos <u>coletores</u> de caudal produzidos a estudo no decorrer do desenho dos nossos circuitos. É a medida d'entre os pontos mais afastados da dimensão <u>longitudinal</u> de cada uma das peças.

	○ $L_{m\acute{a}x}$ (cltr)	• /número,decimal/L/m	Este <i>parâmetro</i> indica do valor máximo da <u>largura</u> definida para o conjunto dos pontos de cada um dos <u>coletores</u> de caudal produzidos a estudo no decorrer do desenho dos nossos circuitos. É a medida d'entre os pontos mais afastados da dimensão <u>horizontal</u> de cada uma das peças.
--	----------------------------	-----------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Aplicar de *variabilidade na atribuição à matriz de peças*, durante o desenho de um circuito, produz *estruturas de peças* para o circuito, de carácter diverso e divergente, quer ao nível da versão ou ao nível do modelo, conforme o que o desenhador (do circuito) entender fazer na sua linha de desenho, seja ramificá-la, mantendo-a dentro do mesmo circuito, ou transferi-la integralmente para o domínio de um novo circuito.

Antes de apresentarmos as *estruturas de peças* atribuídas ao desenho do *nível de estrutura de peças* dos nossos circuitos, listamos a caracterização de cada uma das peças produzidas (para o efeito), agrupadas pela sua *categoria de peça* e atribuídas dos adequados e necessários *parâmetros de ajuste de estruturas* como definidos respetivamente na tabela (14).

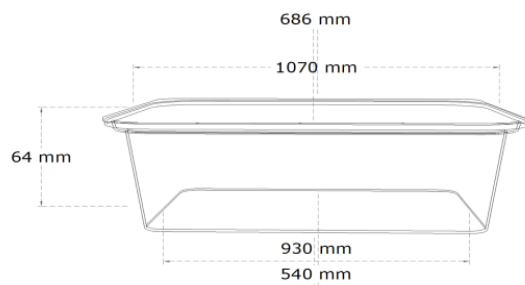
Estas peças foram posteriormente integradas nas *estruturas de peças* constituídas para o desenho dos nossos circuitos.

Tabela 16 – Listagem de todas as peças tipo *depósito* produzidas a partir de atribuição de valores aos *parâmetros de ajuste de estrutura* definidos na categoria correspondente da tabela(14).

Depósitos								
	<i>id</i>	<i>linha(s) de desenho</i>	<i>zona(s) atribuição</i>	<i>Geometria Base</i>	$H_{m\acute{a}x}$ [mm]	$L_{m\acute{a}x}$ [mm]	$C_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\acute{A}rea_{ch\tilde{a}o\ ocupada}$ [m ²]
único_tanque	1	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)	(1,3,4)	cúbico	389	2606	2306	6.85
	2	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₁)						
	3	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₂)						
	4	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₃)						
Independentes_co municantes	14	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	(1,4)	trapezoidal	67	1974	718	0.9
	15	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)						
	16	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)						

	17	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)						
	18	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)						
	5	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	(3,4)	trapezoidal	64	1070	686	0.5
	6	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)						
	7	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)						
	8	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)						
	9	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)						
	10, 19	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	(1,4), (3,4)					
	11, 20	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)						
	12, 21	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)						
	13, 22	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₄)						

dpst_id = (5:13, 19:22)



dpst_id = (14:18)

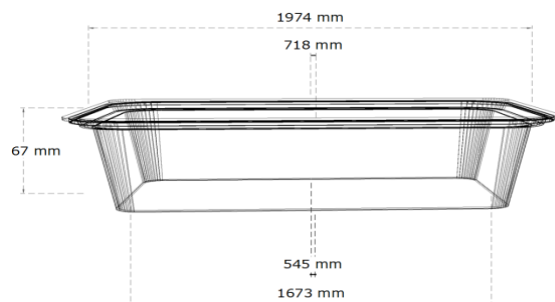


Figura 33 - Figuras com esquema diagramático dos *depósitos_comunicantes_independentes* empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em *mm*.

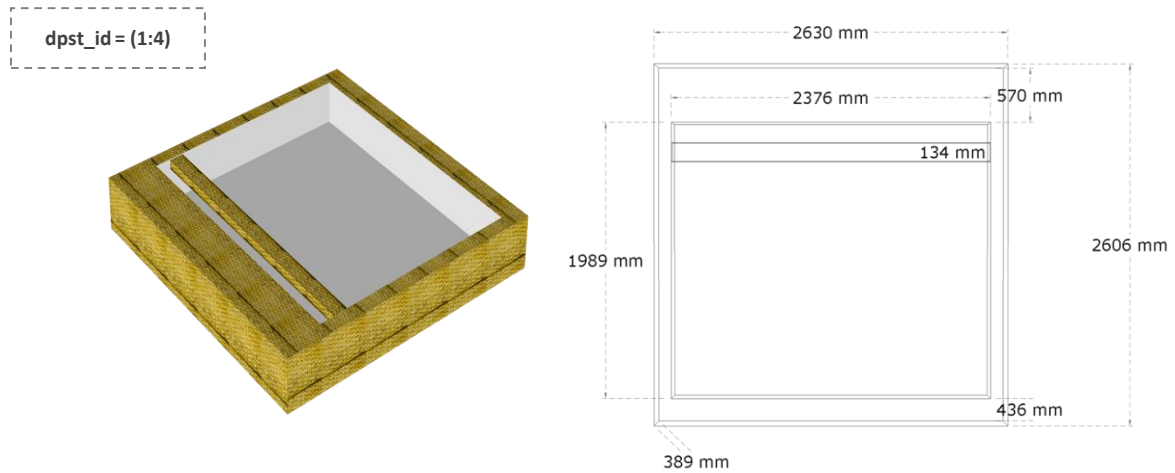


Figura 34 - Figuras com esquema diagramático do depósitos_único_tanque empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em mm.

Tabela 17 - Listagem das peças tipo distribuidor construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(14).

Distribuidores														
	<i>id</i>	<i>linha de desenho</i>	<i>Zona atribuição</i>	<i>Geo. Base</i>	<i>Nºentradas</i>	<i>Nºsaídas</i>	<i>Lentradas [mm]</i>	<i>Lsaídas [mm]</i>	<i>Nºcanaís [mm]</i>	<i>Lecanaís [mm]</i>	<i>Espess. [mm]</i>	<i>C_{máx} [mm]</i>	<i>L_{máx} [mm]</i>	<i>H_{máx} [mm]</i>
pdp	1:3	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	1	cilíndrico	1	12	11	13.4	1	11-50	1	1370	52	52
	4:6	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)												
	13:14	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	1	cilíndrico	1	9	11	7	1	11-50	1	1219	52	52
	16:17	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)												
	15	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)	1	cilíndrico	1	18	11	7	1	11-50	1	198.5	52	52
	20:22	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)	1	cilíndrico	1	24	11	10	1	11-50	0.5	2470	52	52
	23:25	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₁)												
wtrhldr	7:9	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)	1	parabólica	1	6	--	10	--	--	--	1029	139	172
	10:12	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₄)												
	26:28	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₂)	1	parabólica	1	12	--	10	--	--	--	1862	139	195
	29:31	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₃)												

bivalve	18	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)	1	cilindro (bifurcado)	1	18	30	10	1→2	30- 140	10	150	690	165
tubetree	19	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)	1	cilíndrico	1	18	20	4.2	1	12	2	140	140	985

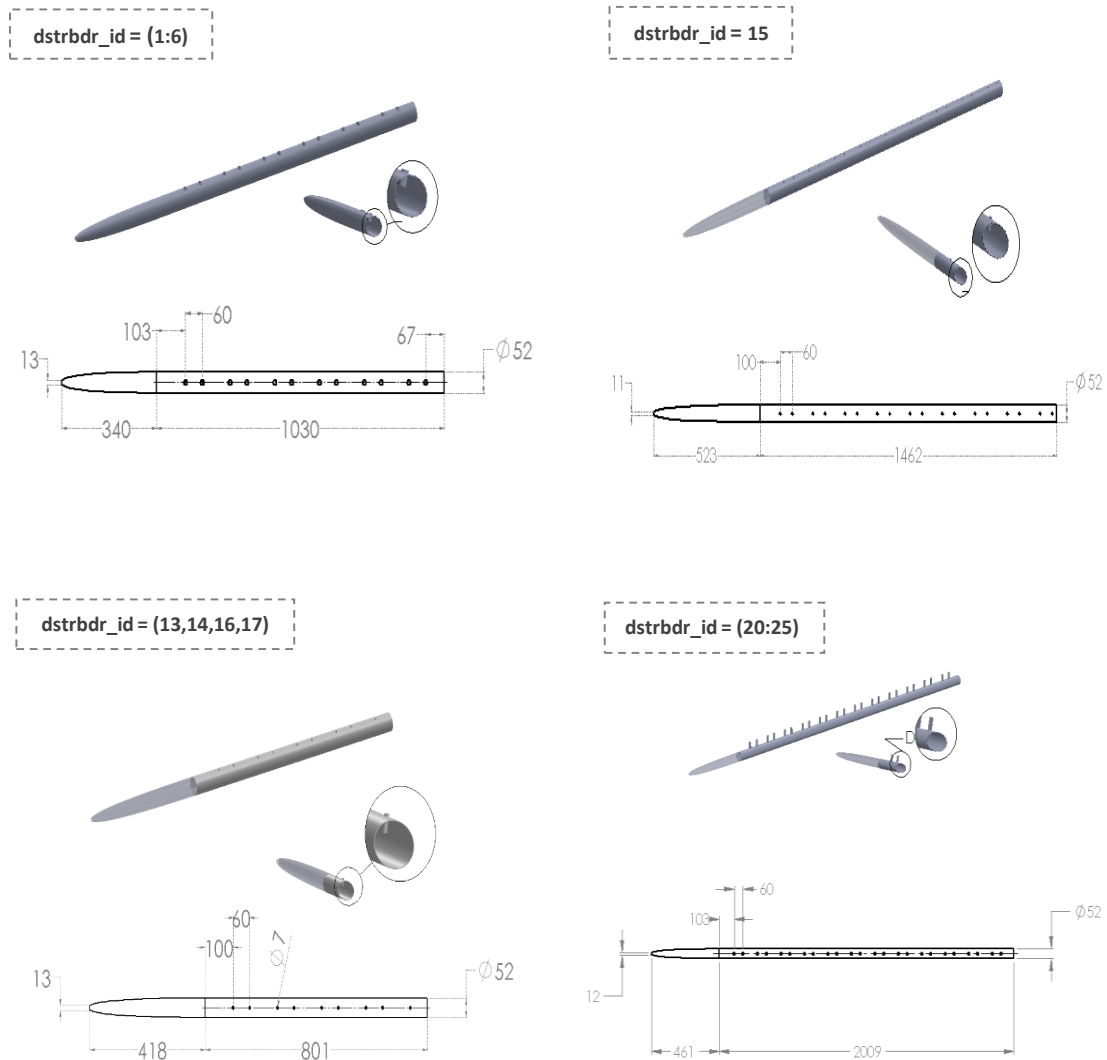


Figura 35 - Figuras com esquema diagramático dos *distribuidores* de solução *pdp* empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em *mm*.

O modelo de distribuidor identifica qual o tipo de distribuição de caudal usado à saída da zona1/entrada das calhas da zona2: distribuição por escoamento interno em pressão, processado no interior de tubos perfurados, denominados *pdp* (*pressure distribution pipes*), *bivalves*, ou, *tube trees*, ou, distribuição por escoamento gravítico com superfície livre, processado em tinas de enchimento, denominadas *wtrhldr* (*waterholders*). O escoamento nos distribuidores será desenvolvido no no estudo da hidráulica dos circuitos, no tópico de hidráulica dos escoamentos.

Os distribuidores de pressão *pdp* têm características geométricas diferentes dependendo do circuito em que estão instalados. São cilindros alongados com saídas perfuradas e uma entrada de transição que suaviza a vorticidade do escoamento e diminui a sua turbulência.

Os distribuidores *wtrhldr* são tinas de água colocadas longitudinalmente em cada piso por cima das entradas das calhas da zona 2. São alimentados pela água que vem da fachada de alimentação e escoam a água por gravidade pela série de saídas longitudinais de borracha que estão colocadas na face inferior. São estudados para os circuitos *SinglePond* e *LongStand*, que possuem prateleiras nos pisos disponíveis para suportar as tinas de água.

Tabela 18 – Quadro resumo dos métodos de escoamento aplicados em cada modelo de distribuidor

Distribuidores	Modelo de escoamento
pdp (pressure distribution pipe)	interno em pressão
wtrhldr (water holder)	gravítico com superfície livre
bivalve	interno em pressão
tubetree	interno em pressão

Tabela 19 - Listagem das peças tipo *divisor* construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(). Estas peças foram utilizadas posteriormente na montagem/construção/constituição de *estruturas de peça* para o desenho dos circuitos.

Divisores													
<i>id</i>	<i>linha de desenho</i>	<i>zona atribuição</i>	<i>Geo. Base</i>	<i>Nº entradas</i>	<i>Nº saídas</i>	<i>L_{entradas} [mm]</i>	<i>L_{saídas} [mm]</i>	<i>Nº canais</i>	<i>L_{canais} [mm]</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>C_{máx} [mm]</i>	<i>L_{máx} [mm]</i>	<i>H_{máx} [mm]</i>
1	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	1	parabólico (perfurado)	1	3	11	11	1	11→20	--	628	70	70
2	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)												
4	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)												
5	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₂)												
3	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	1	parabólico (perfurado)	1	2	11	11	1→2	11	--	105	200	11

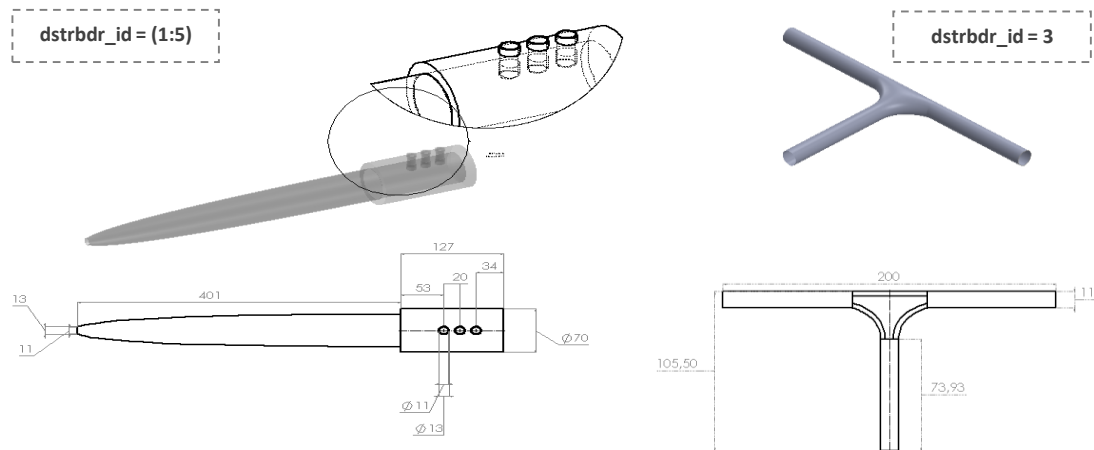


Figura 38 - Figuras com esquema diagramático de todos os *divisores* de solução empregues no desenho de circuitos. As dimensões vêm todas em *mm*.

Os *divisores* de caudal são elementos da fachada de alimentação que dividem um caudal que entra em vários de saída e só são *necessários quando se querem alimentar vários distribuidores em paralelo com uma única bomba*. Nas fachadas em que o nº de distribuidores é igual ao nº de bombas cada distribuidor tem a sua bomba dedicada e o divisor de caudal é dispensável.

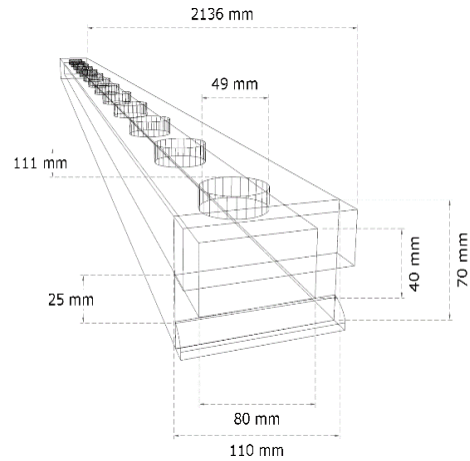
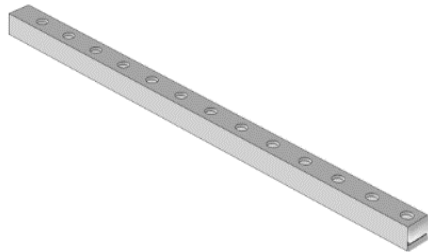
	Condutores										
	<i>id_peça</i>	<i>linha de desenho</i>	<i>zona atribuição</i>	<i>Geometria Base</i>	<i>N^o canais</i>	<i>L_{canais}</i> [mm]	<i>Espessura</i> [mm]	<i>C_{máx}</i> [mm]	<i>L_{máx}</i> [mm]	<i>H_{máx}</i> [mm]	
Mangueiras	1	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)	1	cilindro	1	11	0.5	1082	267	365	
	2							114	279	890	
	3							115	280	1431	
	4							105	281	1995	
	5:40			cilindro (~cotovelo)	1	77	13	87			
	925			cilindro					1	6972	32
	41	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₁)	1	cilindro	1	11	1	31	274	950	
	42							91	274	1493	
	43							151	274	2057	
	44:79							cilindro (~cotovelo)	77	13	87
	926		4	cilindro	1	30	1	6972	32	432	
	80		(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₂)	1	cilindro	1	11	1	1082	267	365
	81	285							13	1081	
	82	295								1624	
	83	311								2187	
	84:101								cilindro (~cotovelo)	4	3
	927			cilindro	1	30	1	6972	32		
	102	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₃)		1	cilindro	1	11	1	213	13	1120
	103		211								1663
	104										2226
	105:122		cilindro						4	3	52
	928		4	cilindro	1	30	1	6972	32	432	
	123	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	1	cilindro	1	11	1	1070	346	411	
	124					22	4	264	30	2257	
	125					11	1	1057	371	13	
	126:143			cilindro		5	1	515	?	1568	

929		4	cilindro	1	30	1	3137	32	432
144	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)	1	cilindro	1	11	1	1456	405	190
145:162			cilindro		5	1	318	?	1385
930			cilindro		30	1	3137	32	432
163	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)	1	cilindro	1	11	1	473	404	405
164					11	1	713	540	405
165:182			cilindro		5	1	502	?	1481
931		4	cilindro	1	30	1	3137	32	432
183	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)	1	cilindro	1	22	4	271	30	422
184:201			cilindro		10	1	346	418	1372
932		4	cilindro	1	30	1	3137	32	432
202	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)	1	cilindro	1	22	4	306	30	488
203:220			cilindro		3	0.5	217	491	1082
933		4	cilindro	1	30	1	3137	32	432
221	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	1	cilindro	1	11	1	137	241	157
222						0.5	54	596	778
223							36	624	1276
224							46	601	1813
225:297			cilindro		1	77	13	87	1
298	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)	1	cilindro	1	11	0.5	596	12	778
299							624	12	1276
300							601	12	1813
301:372			cilindro		1	77	13	87	1
373	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)	1	cilindro	1	11	1	137	241	157
374							69	13	1093
375							68	13	1597

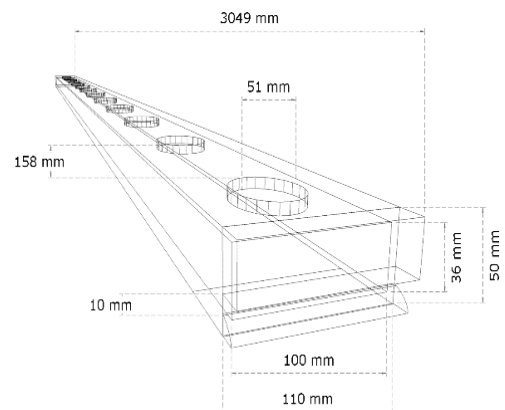
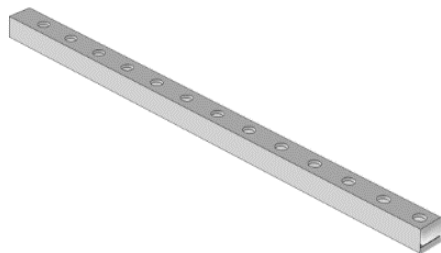
	376							73	13	2101
	377:412			cilindro		4	3	52	10	43
	413	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₃)	1	cilindro	1	22	4	264	30	1229
	414									1749
	415									2257
	416:451			cilindro		4	3	52	10	43
calhas alimentação	452:505	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	2	paralelepípedo	1	80	(30,30)	2136	110	70
	506:559	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)								
	560:613	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)								
	614:667	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₄)								
	668:685	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)	2	paralelepípedo	1	100	(10,14)	3049	110	50
	686:703	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)								
	704:721	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)								
	722:739	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)								
	740:757	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)								
	758:793	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)	2	paralelepípedo	1	98	(12,19)	2129	110	69
	794:829	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₁)								
	830:865	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₂)								
	865:900	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₃)								
calhas coleção	901:903	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	3	parabólico	1	122	40	1265	128	49
	904:906	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)								
	907:909	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)								
	910:912	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₄)								
	913:915	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₀)	3	parabólico	1	122	4	2045	128	71
	916:918	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₁)								
	919:921	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₂)								
	922:924	(EZ ₁ ,ECD ₁ ,EA ₁₃)								

As figuras referentes aos diagramas esquemáticos dos condutores tipo *mangueira*, descritos na tabela superior, são apresentados no caderno anexo ao presente trabalho. As restantes figuras diagramáticas de condutores são apresentadas nas páginas seguintes.

cndtr_id = (452:667)



cndtr_id = (668:757)



cndtr_id = (758:900)

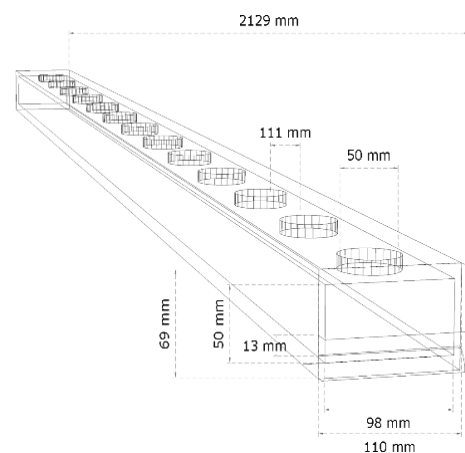
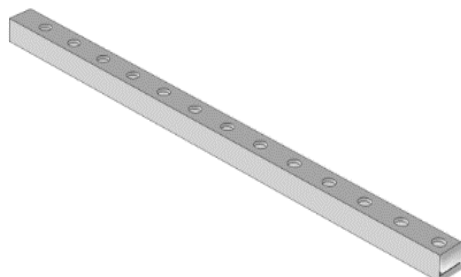


Figura 39 - Figuras com esquema diagramático das calhas de alimentação de solução empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em mm.

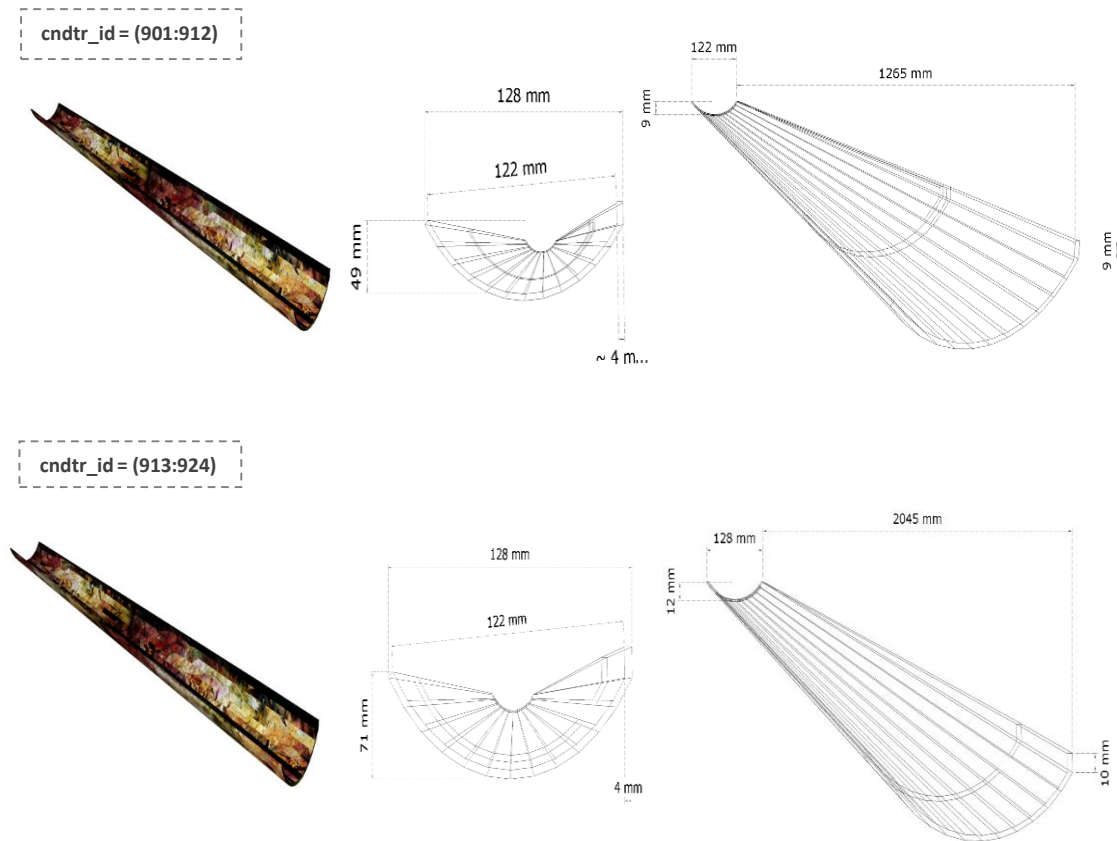


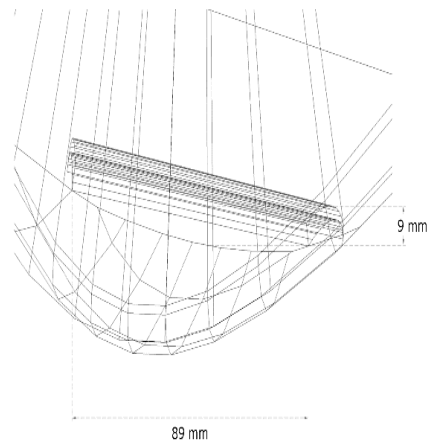
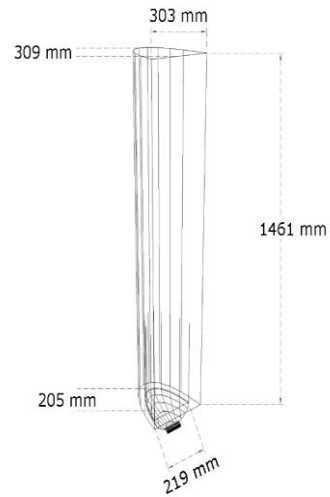
Figura 40 - Figuras com esquema diagramático das *calhas de coleção* de solução empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em *mm*.

Tabela 20 - Listagem das peças tipo *coletor* construídas a partir de atribuição de valores aos parâmetros de ajuste de estrutura correspondentes da tabela(). Estas peças foram utilizadas posteriormente na montagem/construção/constituição de *estruturas de peça* para o desenho dos circuitos.

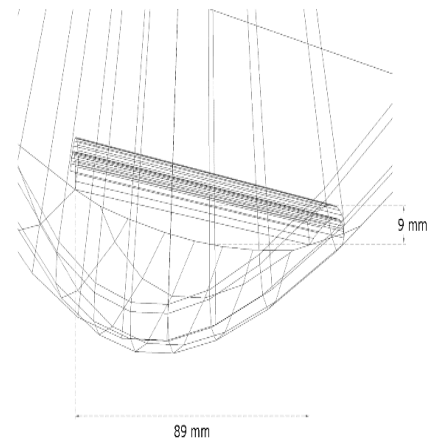
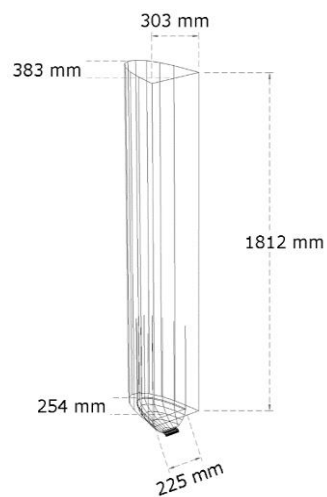
Coletores													
<i>id_peça</i>	<i>linha de desenho</i>	<i>Zona(s) atribuição</i>	<i>Geometria Base</i>	<i>Nº_entrada</i>	<i>Nº_saídas</i>	<i>Ø_entradas [mm]</i>	<i>L_saídas [mm]</i>	<i>Nº_canaís</i>	<i>Lecanais [mm]</i>	<i>Espes. [mm]</i>	<i>C_máx [mm]</i>	<i>L_máx [mm]</i>	<i>H_máx [mm]</i>
1	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁)	3	parabólico	3	1	--	89	1	--	--	309	303	1461
2	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₂)												
3	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₃)												
4	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₄)												
5, 6	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₅)			9	1	--	152	1	152	7	1609	170	53

7,8	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₆)												
9,10	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₇)												
11,12	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₈)												
13,14	(EZ ₂ ,ECD ₂ ,EA ₉)												
15	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₀)												
16	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₁)												
17	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₂)												
18	(EZ ₃ ,ECD ₃ ,EA ₁₃)												

ctrl_id = (1:4)



ctrl_id = (15:18)



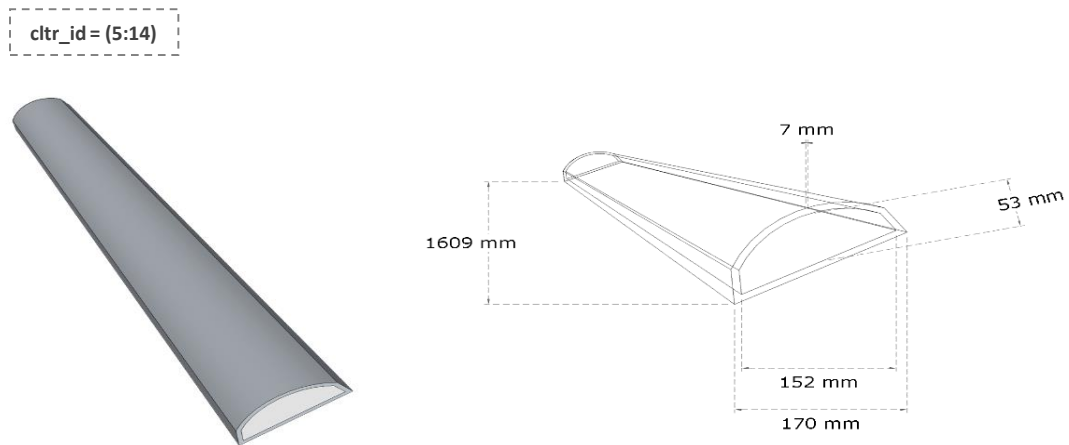


Figura 41 - Figuras com esquemas diagramáticos dos coletores de solução empregues no desenho dos circuitos. As dimensões vêm todas em mm.

Com as peças a usar no nível de estrutura de peças já atribuídas, é-nos agora fácil constituir cada (uma das) estrutura de peças a usar no desenho de estrutura dos circuitos, simplesmente pela identificação zona-a-zona (e para cada estrutura) de quais as peças (e sua identidade) que tomam parte na sua constituição da mesma.

EP1/[EZ3,ECD3,EA1]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	10		19	
Distribuidor	1:3			
Divisores	1			
Condutores	1:40	452:505	901:903	925
Coletores			1	

EP2/[EZ3,ECD3,EA2]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	11		20	
Distribuidor	4:6			
Divisores				
Condutores	41:79	506:559	904:906	926
Coletores			2	

EP3/[EZ3,ECD3,EA3]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	12		21	
Distribuidor	7:9			
Divisores	2			
Condutores	80:101	560:613	907:909	927
Coletores			3	

EP4/[EZ3,ECD3,EA4]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	13		22	
Distribuidor	10:12			
Divisores	4			
Condutores	102:122	614:667	910:912	928
Coletores			4	

EP5/[EZ2,ECD2,EA5]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	5		14	
Distribuidor	13:14			
Divisores	3			
Condutores	123:143	668:685		929
Coletores			5:6	

EP6/[EZ2,ECD2,EA6]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	6		15	
Distribuidor	15			
Divisores				
Condutores	144:162	686:703		930
Coletores			7:8	

EP7/[EZ2,ECD2,EA7]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	7		16	
Distribuidor	16:17			
Divisores				
Condutores	163:182	704:721		931
Coletores			9,10	

EP8/[EZ2,ECD2,EA8]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	8		17	
Distribuidor	18			
Divisores				
Condutores	183:201	722:739	910:912	932
Coletores			11,12	

EP9/[EZ2,ECD2,EA9]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	9		18	
Distribuidor	19			
Divisores				
Condutores	202:220	740:757		933
Coletores			13,14	

EP10/[EZ1,ECD1,EA10]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	1			
Distribuidor	20:22			
Divisores	4			
Condutores	221:297	758:793	913:915	
Coletores			15	

EP11/[EZ1,ECD1,EA11]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	2			
Distribuidor	23:25			
Divisores				
Condutores	298:372	794:829	916:918	
Coletores			16	

EP12/[EZ1,ECD1,EA12]

	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	3			
Distribuidor	26:28			
Divisores	5			
Condutores	373:412	830:865	919:921	
Coletores			17	

EP13/[EZ1,ECD1,EA13]				
	Zona1	Zona2	Zona3	Zona4
Depósitos	24			
Distribuidor	29:31			
Divisores				
Condutores	413:451	865:900	922:924	
Coletores			18	

Figura 42 – Quadros identificativos de quais as peças presentes em cada estrutura de peças constituída a uso no desenho dos nossos circuitos.

Estamos agora em condições de apresentarmos as árvores de desenho dos nossos circuitos, atribuída corretamente do *nível de estrutura de peças*, preenchido com as *estruturas de peças* tratadas no tópico corrente.

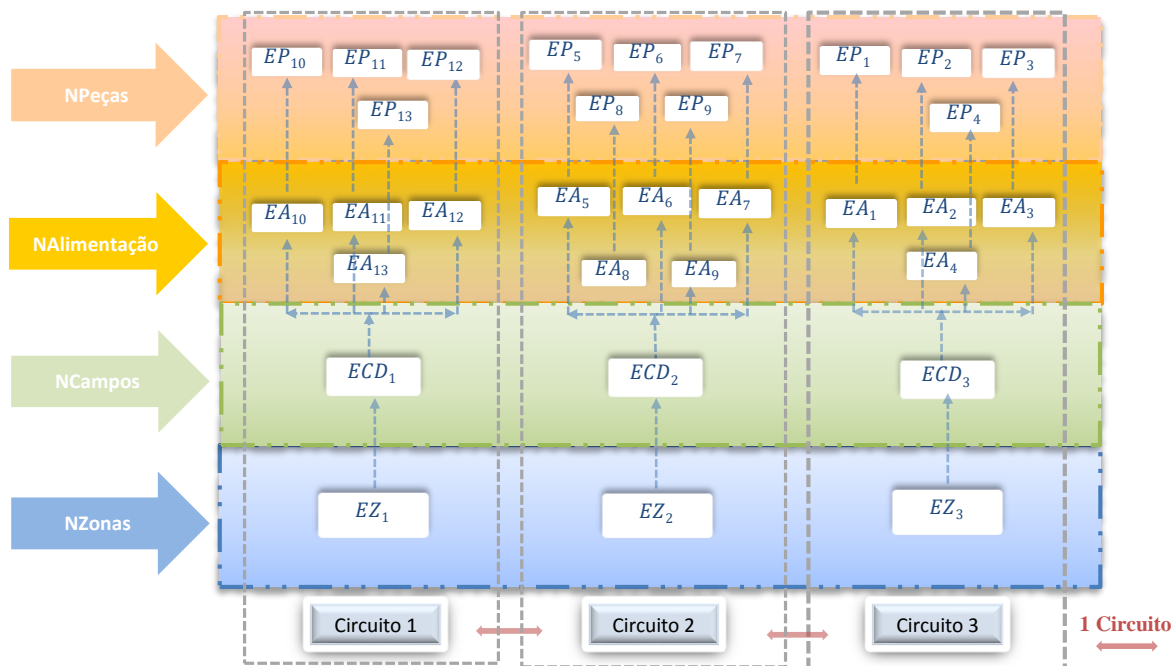


Figura 43 - Árvores de desenho dos circuitos estudados no corrente trabalho. Preenchimento dos níveis de estrutura de zonas, estrutura de campos, estrutura de alimentação e estrutura de peças.

Apesar das diferenças de desenho entre os circuitos, estes são avaliados pelos mesmos parâmetros de desempenho e são descritos pelas mesmas variáveis e equações de desempenho funcional e nasce daqui que podem ser sujeitos a uma mesma abordagem analítica que discutimos a seguir no estudo da hidráulica dos circuitos.

Hidráulica

O estudo de desempenho hidráulico dos circuitos de crescimento foi desenvolvido fazendo uso da mesma estrutura zonal de crescimento definida para o desenho do circuitos. Sobre estes domínios de controlo de fluido, a que corresponde cada zona, aplicámos as equações de *Navier-Stokes*. Os domínios foram escolhidos por forma a facilitarem a leitura funcional do sistema e a sua análise hidráulica, e produzindo sempre que possível parâmetros de desempenho de leitura imediata. Resumimos na tabela seguinte as propriedades que vem com as zonas de estudo adoptadas.

Tabela 21 – Zona de escoamento com componentes, contribuição funcional para o circuito e parâmetros de desempenho a determinar.

Zona de Escoamento	Componentes	Contribuição funcional	$\chi_{desempenho}$
(1) Zona de Alimentação	<ul style="list-style-type: none"> Depósito de alimentação Bombas Mangueiras Distribuidores de caudal Divisores de caudal 	<ul style="list-style-type: none"> Bombagem de água para a zona 2 Distribuição dos caudais de água na entrada da zona 2 	<ul style="list-style-type: none"> $P_{elec,bombagem}$ $V_{H2O,permanência}$ ϵ_{bombas}
(2) Zona de Crescimento	<ul style="list-style-type: none"> Calhas de crescimento 	<ul style="list-style-type: none"> Banhar o rizoma 	<ul style="list-style-type: none"> $V_{H2O,permanência}$ $N_{calhas} [\%], \gamma_n \in [1-3] mm$
(3) Zona de Coleção	<ul style="list-style-type: none"> Calhas de coleção Tinas de coleção Depósito de coleção 	<ul style="list-style-type: none"> Coleção de água da zona 2 	<ul style="list-style-type: none"> $V_{H2O,permanência}$
(4) Zona de Realimentação	<ul style="list-style-type: none"> Depósitos Bombas Mangueiras 	<ul style="list-style-type: none"> Bombagem de água da zona 3 para a zona 1 	<ul style="list-style-type: none"> $P_{elec,bombagem}$ $V_{H2O,permanência}$ ϵ_{bombas}

Zona 1: Zona de Alimentação

A alimentação do circuito começa na zona 1 com a bombagem da água²⁹ que se encontra no depósito de alimentação para a zona 2, através de uma rede de distribuição composta de divisores, condutores e distribuidores. A água presente no depósito encontra-se em regime de estacionariedade e nesta condição a sua superfície livre situa-se 30cm acima da entrada de alimentação das bombas que operam no depósito.

²⁹ Os termos *água*, *solução* e *solução nutritiva* são usados livremente entre si em referência ao mesmo elemento do escoamento Isto, desde que o seu contexto de uso o justifique.



Figura 44 - Fotografias de fachadas de alimentação em NFT e pormenor do distribuidor (fonte: <http://boards.cannabis.com/growing-information/191809-would-you-buy-vertical-growing-unit.html>, 2015).

Análise e Simulações

Os escoamentos internos na zona 1 foram simulados em ambiente gráfico *SolidWorks* (SW) com recurso ao *software* de CFD *FlowSimulation* (FS), de tal forma que o SW serviu à realização do desenho gráfico da rede de alimentação e distribuição, e o FS serviu à realização da simulação das equações de *Navier-Stokes* sobre os respetivos domínios de escoamento. O FS não é no entanto suficiente para simular todas as condições de escoamento que se verificam no decorrer da alimentação dos circuitos.³⁰ Assim, tanto a alimentação das bombas que estão submersas nos depósitos, como a distribuição dos escoamentos nas saídas dos distribuidores de caudal gravíticos com superfície livre colocados à saída da zona 1, precisam de uma análise do escoamento que disponibilize um cálculo analítico diferente, adequado ao carácter das condições referidas. Estes cálculos, que vêm a ser desenvolvidos em maior detalhe em tópico próprio³¹, podem desde já ser descritos como balanços de energia sobre volumes de fluido localmente e adequadamente definidos (para cada situação). Adicionalmente estas análises compreendem a aplicação da equação de Bernoulli sobre dois, convenientemente selecionados, pontos de escoamento do domínio de fluido em estudo, com a finalidade de conseguirmos uma avaliação detalhada das condições locais de escoamento em saídas e entradas de fluido determinadas e importantes para a caracterização do fenómeno necessário – quer seja a leitura da potência de mecânica que entra na bomba, quer seja a pressão total de saída do fluido nos condutores da distribuição gravítica com superfície livre.

³⁰ Isto acontece porque o FS não é capaz de simular corretamente escoamentos gravíticos, nem escoamentos com superfície livre.

³¹ Ver *alimentação e bombagem de água: distribuidores de saída*

A aplicação da equação de balanço de energia sobre um volume de controlo de fluido onde haja entrada e saída de energia, sem geração, mas com possibilidade de destruição, i.e. perdas, pode tomar a forma genérica,

$$H_{out} + H_{perdas} = H_{in} \quad (18)$$

Onde H é a *cabeça de energia mecânica do escoamento* em cada termo e, para os termos H_{in} e H_{out} , vem dada por,

$$H = \frac{p_{estática\ manométrica}}{\rho g} + \frac{v_{fluido}^2}{2g} + z \quad (19)$$

$$H = \frac{P_{total}}{\rho g} \quad (20)$$

ρ é a densidade do fluido em escoamento, que no caso é tomada como igual à da água a 25[°C]; g é a aceleração da gravidade e vale 9.8 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$; $p_{estática\ manométrica}$ é a pressão estática manométrica do fluido no ponto de leitura, e é normalmente um parâmetro que queremos calcular ou obter por meio de simulação; v_{fluido} é o módulo da velocidade de escoamento do fluido na direção longitudinal do escoamento, medida na superfície da secção transversal do canal de escoamento considerado e no ponto desejado. Vem dada por,

$$v_{fluido} = \frac{Q_{vol\ solução}}{A_{secção\ transversal}} \quad (21)$$

Onde $Q_{vol\ solução}$ é o caudal volumétrico de fluido a escoar na superfície transversal da área de medição e $A_{secção\ transversal}$ é a área desta superfície. $Q_{vol\ solução}$ relaciona-se com o caudal mássico de fluido em escoamento pela expressão,

$$\dot{m}_{solução} = Q_{vol\ solução} \times \rho_{solução} \quad (22)$$

Quando estudamos as circulações entre as *superfícies livres* dos distribuidores gravíticos e as suas saídas de condução, temos que o termo de entrada de energia da equação de balanço iguala as condições do escoamento na *superfície livre* do volume de controlo do fluido,

$$H_{in} = H_{sup.livre} \quad (23)$$

Quando for necessário fazer o cálculo do termo H_{perdas} no decorrer de um balanço de energia referente a um qualquer volume de controlo tomado para a avaliação dos escoamentos pertinentes nas fases de alimentação a caracterizar, a sua forma tem de ser definida. No nosso trabalho só tivemos de calcular analiticamente o termo de perdas para os condutores de caudal de saída que transportam a solução do distribuidor gravítico para as calhas da zona 2. O termo de perdas, durante o escoamento em pressão de um fluido confinado, vem genericamente dado pela equação,

$$H_{perdas} = H_{minor losses} + H_{major losses} \quad (24)$$

, em que $H_{minor losses}$ diz respeito às perdas *não friccionais* do escoamento e $H_{major losses}$ diz respeito às perdas *friccionais* do escoamento. Se ajustarmos cada um destes termos de perdas às características dos condutores de saída da zona 1, como vem presentes nos distribuidores gravíticos com superfície livre,³² ficamos com,

$$H_{minor losses} = H_{smooth bend 90^\circ} + H_{entrance loss} \quad (25)$$

$$H_{minor losses} = (kl_{90^\circ} + kl_{entrance}) \times \frac{v^2}{2g} \quad (26)$$

Onde $kl_{90^\circ} = 0.3$ e $kl_{entrance} = 0.8$

$$H_{major losses} = f \times \left(\frac{L}{D_h} \right)_{tubo de borracha} \times \frac{v^2}{2g} \quad (27)$$

($D_{h\ tubo de borracha} = 0.005 [m]$ e $L_{tubo de borracha} = 0.06 [m]$ para todos os condutores de saída dos distribuidores gravíticos com *superfície livre*.)

Na equação (27), D_h é o *diâmetro hidráulico* do canal, que no caso de um ducto de secção circular é dado por,

$$D_h = D_{ducto} \quad (28)$$

(valendo, $D_{ducto} = 0.005 [m]$, para os condutores de solução tratados à saída dos distribuidores gravíticos da zona 1).

, v é a velocidade de escoamento no condutor de saída e é dada pela equação (21), com a área da secção transversal do canal a valer $A_{tubo borracha}$, e Q_{vol} ,

$$Q_{vol,p/saída do dstrbdr} = \frac{Q_{vol,entrada no distribuidor}}{N_{tubos de borracha saída dstrbdr}} \quad (29)$$

onde, $Q_{vol, entrada no distribuidor}$ é obtido por simulação da rede em FS e $A_{tubo de borracha}$ é a área da secção circular do tubo de borracha usado como ducto de saída do distribuidor gravítico da zona 1, e o seu valor é dado por,

$$A_{tubo de borracha} = (D_{ducto})^2 \times \frac{\pi}{4} \quad (30)$$

³² Nestes condutores de caudal o escoamento faz-se por escoamento interno em pressão com ducto plenamente preenchido e secção transversal circular.

(substituindo o diâmetro do ducto pelo seu valor já apresentado, obtemos um valor de $A_{tubo\ de\ borracha} = 1.96 \times 10^{-5} [m^2]$).

De novo na equação (27) f é o fator de fricção de *Darcy* e é obtido como solução da iteração da equação de *Swamee-Jain* para escoamentos laminares, transicionais e turbulentos,

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9.5 \times \left[\ln \left(\frac{k}{3.7 \times D_h} + \frac{5.8}{Re^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125} \quad (31)$$

, nesta última Re é o número de Reynolds dado por,

$$Re = \frac{v_{fluido} \times D_h}{\mu} \quad (32)$$

, onde, μ é a viscosidade cinemática do fluido que no caso da água vale $1.307 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ e k é a rugosidade absoluta da borracha e vale $38 [\mu m]$.

Assim, podemos usar a expressão seguinte para calcular a *cabeça de energia de perdas mecânicas*, ocorrente, nos nossos escoamentos de saída, dos *distribuidores gravíticos com superfície livre* da zona 1,

$$H_{perdas} = \left[(0.3 + 0.8) + f \times \left(\frac{L}{D_h} \right)_{tubo\ de\ borracha} \right] \times \frac{\left(\frac{Q_{vol}}{A_{tubo\ borracha}} \right)^2}{2g} \quad (33)$$

No caso de estarmos a estudar escoamentos que ocorrem no interior de um domínio de fluido incompressível, invíscido e estacionário, podemos aplicar da *Equação de Bernoulli* a qualquer trajeto de escoamento constituído no interior do domínio que respeite estas condições. Nesta situação vale aplicar a seguinte relação de igualdade, para quaisquer dois pontos de fluido no interior do domínio de escoamento,

$$H_1 = H_2 \quad (34)$$

Os resultados dos cálculos de todas estas variáveis de caracterização dos escoamentos de zona 1, são apresentados, para os respetivos circuitos, e de acordo com a análise funcional adequada a aplicar à estrutura de alimentação do circuito, nos tópicos ***Alimentação e Bombagem e Distribuição***.

Em seguida apresentamos um quadro-resumo dos métodos de análise de escoamento aplicados a cada zona 1 de cada um dos circuitos estudados neste trabalho.

Tabela 22 – Fases de análise, componentes e análise aplicada na fase, para cada circuito.

Fases de análise	Alimentação e Bombagem	Distribuição		
Componentes	tanque e bomba	rede mangueiras	distribuidor de saída	
			escoamento interno	superfície livre
Tipo de análise	Balanço de energia + Bernoulli	FS	FS	Balanço de energia + Bernoulli

EZ1,ECD1

EA10,EP10	x	x	x	
EA11,EP11	x	x	x	
EA12,EP12	x	x		x
EA13,EP13	x	x		x

EZ2,ECD2

EA5,EP5	x	x	x	
EA6,EP6	x	x	x	
EA7,EP7	x	x	x	
EA8,EP8	x	x	x	
EA9,EP9	x	x	x	

EZ3,ECD3

EA1,EP1	x	x	x	
EA2,EP2	x	x	x	
EA3,EP3	x	x		x
EA4,EP4	x	x		x

No entanto, seja qual for o circuito considerado, o conjunto das análises e simulações aplicadas na sua zona 1 da estrutura produz sempre o mesmo conjunto de parâmetros de *output*, que são suficientes e adequados para caracterizar o seu desempenho funcional: **i)** os caudais de água em todas as saídas do distribuidor ($\dot{m}_{massa,saídas}$ ou $Q_{vol,saídas}$); **ii)** as pressões mecânicas totais mínimas em todas as saídas do distribuidor ($p_{saídas}$); **iii)** e a pressão mecânica total fornecida pela bomba à rede de alimentação, i.e. logo à saída da bomba ($p_{entradas}$). A importância de cada um destes parâmetros é discutida em seguida.

A distribuição dos caudais à saída da zona 1 é importante porque determina a distribuição dos caudais à entrada das calhas de crescimento da zona 2. Os caudais de entrada nas calhas de crescimento da zona 2 são uma das variáveis de controlo hidráulico que mais afetam a qualidade dos escoamentos nessa zona. A qualidade dos escoamentos na zona 2 é o parâmetro mais importante a garantir para o sucesso do bom funcionamento do circuito e será desenvolvida em tópico respetivo.

As pressões mecânicas totais mínimas em cada saída do distribuidor usado são importantes porque determinam se o caudal de água à saída do distribuidor vai conseguir vencer a pressão do meio envolvente e evitar ser estrangulado por ela.

A pressão mecânica total fornecida pela bomba à rede de alimentação é importante em primeira instância para dimensionar a bomba a instalar no circuito e em última análise porque esta pressão é um dos determinantes-chave de como o escoamento se desenvolve na rede de alimentação do circuito.

Simulações em FS: fronteiras e condições de escoamento

As simulações em FS requerem a definição de condições-fronteira no subdomínio de fluido. Estas condições-fronteira são afetadas às entradas e às saídas do fluido no domínio de análise e às superfícies internas do escoamento. As condições-fronteira permitem definir o sentido do escoamento no volume de fluido, introduzir rugosidade nas paredes dos ductos e inicializar a iteração das soluções locais de *Navier-Stokes*. As condições-fronteira nas entradas e nas saídas podem ser introduzidas na forma de pressões, ou de caudais e pressões. As condições-fronteira nas paredes interiores, são introduzidas na forma de alturas de rugosidade dos materiais. Os domínios de fluido simulados têm uma fronteira de entrada e um número variável de fronteiras de saída dependendo do circuito considerado e do distribuidor de saída, usado.

Optou-se para as simulações em FS de introduzir as condições-fronteira na forma de um caudal de massa à entrada, pressões mecânicas totais nas saídas e uma condição de rugosidade nas paredes interiores.

O valor do caudal de massa na entrada é suficiente para garantir o balanço de massa em todo o circuito; o valor das pressões totais mínimas nas saídas serve para, em conjunto com os caudais locais, inicializar as iterações de *Navier-Stokes* no que diz respeito aos balanços de energia e aos balanços de momento; o valor da rugosidade nas paredes interiores caracteriza mais corretamente os efeitos do atrito junto à parede do condutor.³³

Tabela 23 – Regiões fronteira do escoamento na fase de distribuição da zona 1 e condições exigidas aos resultados das simulações para as simulações em FS.

Região da fronteira	Nº de regiões	$\chi_{fronteira}$	Condição exigida
Entrada	1	$\dot{m}_{massa, entrada}$ [kg/s]	equação (35)
Saída	Nº de saídas no distribuidor	$p_{total, min}$ [Pa]	$P_{total, min, saída_i} > 101325$ [Pa], $\forall saída_i$
Paredes	--	Z_o [μm]	$k_{o, PVC} = 4.25$ [μm] ³⁴ ; $k_{o, borracha} = 38$ [μm]

- **Caudal de escoamento na zona**

Para calcular o caudal de massa à entrada da rede, primeiro determinou-se um valor de fronteira para o caudal de massa total à saída da rede e em seguida aplicou-se uma equação de continuidade da massa ao escoamento na rede, para as condições tomadas, de que, o volume total de fluido de solução na rede é invariável ao longo do tempo, e a sua densidade é igual à da densidade da água a 25°C,

³³ Para mais informações sobre a definição das condições-fronteira em FS, consultar o manual de FS.

³⁴ http://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html

$$\dot{m}_{\text{entrada/rede_alimentação}} = \sum_{1}^{N_{\text{condutores de crescimento na zona 2}}} \dot{m}_{\text{idealizado/condutor_da_zona_2}} \quad (35)$$

Para determinar o caudal de massa total à entrada da rede de alimentação da zona 1 considerou-se o caso idealizado de que todos os condutores de crescimento presentes na estrutura da zona 2 escoam o caudal idealizado de $1 \left[\frac{L}{min} \right]$. Este caudal é sugerido como a *rule of thumb* para a produção NFT em canais prismáticos de secção retangular.³⁵ Adicionalmente considerou-se que cada saída de distribuição de caudal, que escoe para um canal independente de crescimento na zona 2, escoar um valor de,

$$\dot{m}_{\text{idealizado/p saída dstrbr}} = \frac{1}{N_{\text{saídas dstrbr/p canal de crescimento ind.}}} \times \dot{m}_{\text{idealizado/p condutor_da_zona_2}} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{\text{idealizado/p condutor_da_zona_2}} = 0.017 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (37)$$

Este valor tomado para o $\dot{m}_{\text{idealizado/p condutor_da_zona_2}}$ influência a altura da superfície livre de escoamento de solução que se estabelece no interior dos canais de crescimento da zona2, com implicações para a imersão do rizoma na solução nutritiva e para a sua habilidade para absorver oxigénio e nutrientes. Este papel será abordado novamente na discussão da zona 2 e no tópico sobre a oxigenação da solução. O valor assumido para estes caudais de massa é um garante do aproximado bom funcionamento do escoamento nas calhas da zona2.

O número total de condutores de crescimento presentes na zona 2 de um circuito varia com o tipo de estrutura de 2 níveis, (EZ,ECD), que está presente no circuito. Como ficou já definido, estudo gráfico dos circuitos, temos que existem três estruturas (EZ,ECD) disponíveis na caracterização dos circuitos de crescimento. Cada uma destas estruturas tem respetivamente, 18 condutores de zona 2, 36 condutores de zona 2 e 18 condutores de zona 2. A tabela (24) apresenta os caudais totais de massa que escoam em cada estrutura.

Tabela 24 - Caudal de entrada na zona 1 calculado para cada um dos circuitos, segundo a eq.35.

EZ,ECD	Nº condtrs de saída	$\dot{m}_{\text{entrada_rede_alimentação}} \text{ [kg/s]}$
EZ_2, ECD_2	18	0.3
EZ_3, ECD_3	36	0.6
EZ_1, ECD_1	18	0.3

Este caudal de entrada na zona 1 é necessário para inicializar as equações de *Navier-Stokes* no seu domínio de simulação, usando FS, mas no entanto não é garante de que os valores obtidos para os caudais simulados nas saídas dos distribuidores da rede de alimentação sejam idênticos aos dos caudais idealizados admitidos para os mesmos. Isto, porque, não é possível garantir, *a priori*, de que em todos os circuitos onde haja nós de distribuição na rede de alimentação, os caudais de escoamento se distribuam, sempre e em cada nó, uniformemente pelos caminhos

³⁵ [http://www.hydroponics.com.au/issue-04-nft-culture/]

disponíveis. Aliás, esta é uma das razões que nos leva a simular os escoamentos na rede de alimentação, i.e. para auferirmos a uniformidade da sua distribuição.

Somente nos casos nos quais a rede de alimentação de um circuito não tenha nós de distribuição ao longo do seu trajeto, é que podemos admitir que o caudal de saída em cada saída do distribuidor, e o caudal de entrada em calha de crescimento, são idênticos, respetivamente, aos valores dados pelas equações idealizadas, (36) e (37).

- **Pressões nas saídas**

As condições-fronteira, de pressão total nas saídas do escoamento da zona1, foram introduzidas e ajustadas nas condições de simulação do FS, de tal forma, que garantissem que os valores simulados de pressões totais mínimas nas saídas de cada condutor de saída da zona fossem, de acordo com a condição exigida na tabela (23). I.e. que a pressão total mínima em qualquer saída do distribuidor seja superior à p_{atm} de 101325 [Pa]. Esta condição garante que o fluxo não é estrangulado à saída pela envolvente atmosférica.

- **Superfícies internas**

As condições-fronteira nas paredes internas das peças por onde se processa o escoamento, exigem que as alturas de rugosidade dos materiais utilizados correspondam à do PVC ou à da borracha de silicone, que foram os materiais utilizados na construção da nossa rede de alimentação na zona 1. Respetivamente, o PVC foi usado para os distribuidores e divisores de caudal e a borracha de silicone foi usada para os condutores de caudal.

Simulações em FS: transiente e estacionário

O FS permite simular em regime de estacionariedade ou em regime de transiente. O estudo em transiente foi escolhido porque notou-se, após simulações preliminares, que na maioria dos escoamentos estudados geravam-se vorticidades elevadas em certas zonas dos circuitos, o que introduzia oscilações cíclicas nos parâmetros locais dos escoamentos calculados. É sugerido que aplicar *Navier-Stokes* em regime transiente incorpora melhor estas oscilações temporais e produz resultados de escoamento local mais corretos do que o estudo em estacionariedade.³⁶ Estas oscilações dos parâmetros locais do escoamento foram no entanto sempre incapazes de afetar significativamente a evolução do seu valor médio, que estabilizava decorridos poucos segundos de simulação, adicionalmente a terem um desvio-padrão pouco significativo.

Bombagem e Alimentação

Nesta fase do escoamento realiza-se a bombagem e a alimentação de solução ao conjunto do circuito. Uma bomba, submersa em água, dentro de um tanque de alimentação, escoar um caudal determinado de massa $\dot{m}_{entrada/rede_alimentação}$, ao qual fornece uma energia mecânica ΔH , dada na forma de uma cabeça de energia, e calculada como a diferença entre a cabeça de energia mecânica que entra na bomba e a cabeça de energia mecânica que sai,

$$\Delta H_{bomba} = H_{saída,bomba} - H_{entrada,bomba} \quad (38)$$

³⁶ Ver manual de simulação do FS

Pela equação (20), temos que, se soubermos a pressão mecânica total de fluido à entrada da rede de alimentação, podemos calcular imediatamente a cabeça de energia ocorrente à entrada da rede de alimentação, $H_{saída,bomba}$. A $p_{total,entrada}$ necessária para o cálculo de $H_{saída,bomba}$ é obtida mediante a leitura dos resultados das simulações FS sobre o domínio de escoamento interno da rede de alimentação e distribuição da zona 1, e considerada na sua forma manométrica. Complementarmente, o programa FS calcula o volume total de fluido que preenche a rede de alimentação e de distribuição da zona1, e este parâmetro é uma das variáveis desejadas para avaliar o desempenho da zona.

$H_{entrada,bomba}$ é calculado pela aplicação da *Equação de Bernoulli* [eq(34)] entre a *superfície livre* da água no tanque de alimentação e a entrada da bomba considerada.

Pelas equações (34) e (19) temos,

$$H_{sup.livre, tanque} = H_{entrada, bomba} \quad (39)$$

$$H_{entrada,bomba} = Z_{superfície livre \rightarrow bomba} \quad (40)$$

Como imposto antes, a altura da superfície livre é de 0.3 m, assim,

$$\Delta H_{bomba} = \frac{p_{total,entrada}}{\rho_{H2O} \times g} - 0.3 \quad (41)$$

Com ΔH_{bomba} e $\dot{m}_{entrada, rede, alimentação}$ calculados consultou-se o catálogo *EHEIM pumps 2010* para selecionar as bombas que pudessem satisfazer as condições de bombagem calculadas. Foi necessário para alguns casos fazer séries de bombas de forma a garantir que a cabeça de energia necessária ao circuito era satisfeita - dado que a cabeça de energia é somada numa série de bombas ligadas entre si,

$$\Delta H_{série de bombas} = \sum_{i=1}^{N \text{ bombas em série}} \Delta H_{bomba} (i) \quad (42)$$

Na escolha das bombas sobre dimensionou-se a cabeça de energia instalada de forma a incluir possíveis perdas na transmissão entre bombas ou outras perdas sub-consideradas na análise.

A potência elétrica total instalada para bombagem, num dado circuito, é o resultado da soma das potências elétricas nominais de todas as bombas instaladas para bombagem no circuito. Os valores das potências elétricas são consultados no catálogo do fabricante e os seus preços³⁷ indicados como complemento.

³⁷ <http://www.thereeftank.com/Eheim-Pump>

Tabela 25 – Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ_3 , ECD_3 .

(EZ3,ECD3)					Catálogo EHEIM			
Estruturas de Zonal	$\dot{m}_{\text{entrada_rede_alimentação}}$ [kg/s]	$Q_{\text{vol bomba}}$ [L/min]	$p_{\text{total, entrada}}$ [Pa]	ΔH_{bomba} [m]	$N^{\circ}_{\text{bombas}}$	(#), Modelo das bombas	€ _{bombas} [€]	$P_{\text{elétrica}}$ [W]
pdp								
EA1,EP1	0.59982	36.03	64646	6.30	5	(5)CP 1102	504	390
EA2,EP2					4	--	240-628	223
1° piso	0.19994	12.01	22368	1.98	--	(1)CP 1260	60-157	65
2° piso	0.19994	12.01	25804	2.34	--	(1)CP 1260	60-157	65
3° piso	0.19994	12.01	34009	3.17	--	(1)CP 1260 (1)CP 1250	120-314	93
wtrhldr								
EA3,EP3	0.59982	36.03	36824	3.46	3	(3)CP 1102	381	234
EA4,EP4					3	--	210-414	165
1° piso	0.19994	12.01	12569	0.98	--	(1)CP 1100	89-100	35
2° piso	0.19994	12.01	17757	1.81	--	(1)CP 1260	60-157	65
3° piso	0.19994	12.01	23047	2.35	--	(1)CP 1260	60-157	65

Tabela 26 - Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ_2 , ECD_2 .

(EZ2,ECD2)					Catálogo EHEIM			
Estruturas de Zonal	$\dot{m}_{\text{entrada_rede_alimentação}}$ [kg/s]	$Q_{\text{vol bomba}}$ [L/min]	$p_{\text{total, entrada}}$ [Pa]	ΔH_{bomba} [m]	$N^{\circ}_{\text{bombas}}$	(#), Modelo das bombas	€ _{bombas} [€]	$P_{\text{elétrica}}$ [W]
pdp								
EA5,EP5	0.29991	18.01	62693	6.10	4	(3/4)CP1262	240-308	320
EA6,EP6	0.29991	18.01	50370	4.84	3	(3)CP1262	180-231	240
EA7,EP7					2		260	156
1°dstrbdr	0.14995	9.00	22568	2.00	1	(1)CP1102	130	78
2°dstrbdr	0.14995	9.00	21497	1.89	1	(1)CP1102	130	78
Bivalve								
EA8,EP8	0.29991	18.01	10567	0.77	1	(1)CP1101	77	66
TubeTree								
EA9,EP9	0.29991	18.01	48845	4.68	1	(3)CP1102	390	234

Tabela 27 - Características da bombagem nas configurações da zona 1 dos circuitos, EZ_1 , ECD_1 .

(EZ1,ECD1)					Catálogo EHEIM			
Estruturas de Zonal	$\dot{m}_{entrada_rede_alimentação}$ [kg/s]	$Q_{vol\ bomba}$ L/min	$p_{total,entrada}$ [Pa]	ΔH_{bomba} [m]	N^o_{bombas}	(#), Modelo das bombas	ϵ_{bombas} [€]	$P_{elétrica}$ [W]
pdp								
EA10,EP10	0.59982	36.03	64646	6.30	4	(3)CP 1262 (1)CP 1100	215-476	275
EA11,EP11					3	--	200-275	135
1º piso	0.19994	12.01	22368	1.98	1	(1)CP 1100	77	35
2º piso	0.19994	12.01	25804	2.34	1	(1)CP 1100	77	35
3º piso	0.19994	12.01	34009	3.17	1	(1)CP 1260	46-121	65
wtrhldr								
EA12,EP12	0.59982	36.03	36824	3.46	4	(3)CP 1102 (1)CP 1100	470	269
EA13,EP13					3		200-275	135
1º piso	0.19994	12.01	12569	0.98	1	(1)CP 1100	77	35
2º piso	0.19994	12.01	17757	1.81	1	(1)CP 1100	77	35
3º piso	0.19994	12.01	23047	2.35	1	(1)CP 1260	46-121	65

Distribuição

Consideraram-se dois modelos de distribuição de água na saída da zona 1. Um por gravidade com *superfície livre* e outro por escoamento interno em pressão.

O *escoamento por gravidade* ocorre numa tina cheia de água com *superfície livre* que alimentada em regime de estacionariedade vai escoando água por uma série longitudinal de tubinhos de borracha que ligam às entradas das calhas da zona 2. É a diferença de alturas entre a *superfície livre* da água e as saídas dos tubos de borracha que gera as correntes de fluido no interior da tina, à medida que o fluido é deslocado de um potencial gravítico mais alto para um potencial gravítico mais baixo, transformando pelo caminho energia potencial gravítica em energia cinética e perdas. A tina de água está colocada aproximadamente por cima da entrada das calhas da zona 2 e prolonga-se ao longo de todo o comprimento frontal da fachada de alimentação da estrutura de alimentação da zona 1 de cada circuito.

A alimentação das tinas é realizada, em cada piso, colocando a saída da rede de alimentação, nesse piso, diretamente por cima da abertura da tina. A uniformidade na distribuição dos caudais às saídas de cada tina só pode ser garantida por gravidade se a altura da *superfície livre* da água for a mesma para todo o volume de água na tina. Esta é uma condição necessária, e a sua observação vem da aplicação da equação de conservação de energia num tubo de corrente que vá desde a *superfície livre* da água até à saída de um dos tubos de borracha, considerando que a *equação de Bernoulli* é válida para o trajeto considerado entre a *superfície livre* da água e a entrada do tubo.

Assim, temos, pela aplicação das equações (34) e (18), (19) e (33) ao escoamento gravítico da água na tina de distribuição, respetivamente para os troços *superfície livre* → *entrada do tubo* e *entrada do tubo* → *saída do tubo*, a seguinte relação de balanço de energia,

$$\frac{(Q_{vol})^2}{2 \times g \times (A_{tubo\ borracha})^2} + \left[(0.3 + 0.8) + f \times \left(\frac{L}{D_h} \right)_{tubo\ de\ borracha} + 1 \right] = Z_{suplivre \rightarrow saída\ tubo} \quad (43)$$

Usando os valores de $Q_{vol, total\ entrada\ no\ distribuidor}$, para cada piso, obtidos por simulação e leitura no FS, e as propriedades geométricas dos respectivos tubos de borracha, que são descritas para cada circuito no estudo gráfico dos circuitos, no respeitante à descrição das peças da estrutura de alimentação, condutores, podemos saber qual é a altura de *superfície livre* que se vai estabelecer em cada distribuidor, no caso de haver uma distribuição uniforme dos escoamentos em estacionariedade. No entanto, apesar da uniformidade na distribuição da altura da *superfície livre* da água na tina ser uma condição necessária para a distribuição gravítica uniforme dos escoamentos de solução nas saídas dos distribuidores, não é por si só uma condição suficiente. As, já introduzidas garantias, *a priori*, necessárias para aplicação da *equação de Bernoulli*, ao campo de escoamento do fluido, tem de se verificar, adicionalmente, a que temos de considerar, que, valores de $Z_{suplivre}$ calculados, que sejam pouco profundos, podem representar uma limitação à distribuição uniforme da água na tina, porque podem limitar a capacidade da água que entra na tina em propagar-se igualmente por todo o seu volume, ficando, em contrário, esta, concentrada junto às saídas do distribuidor mais alinhadas com o jato de entrada; O mesmo pode acontecer para alturas $Z_{suplivre}$ que não sejam rasas, bastando para isso, que, o fluxo de entrada corte, em jato profundo, o volume de fluido presente na tina e atinga maioritariamente as saídas mais alinhadas, longitudinalmente, com a posição de entrada do jato. Por seu lado valores de $Z_{suplivre}$ muito elevados podem ultrapassar a altura do rebordo da tina e transbordar a solução para fora. Assim vê-se que há muita incerteza quanto à assunção de que a uniformidade na altura da *superfície livre* da água ao longo de toda a extensão do distribuidor se verifica na realidade do seu funcionamento. No entanto é esta premissa que assume a base de todos os nossos cálculos relativos à distribuição gravítica.

Tabela 28 – Caraterísticas do escoamento gravítico nas tinas de distribuição, assumindo a hipótese do preenchimento uniforme de fluido na tina.

	$Q_{vol\ entrada\ dstrbdr}$ [m ³ /s]	$N^o\ saídas\ dstrbdr$	$Q_{vol\ p/saída\ dstrbdr}$ [m ³ /s]	$f_{fricão}$	$Z_{suplivre}$ [m]
(EZ3,ECD3)					
EA3,EP3					
1º piso	25.9E-05	12	2.16E-05	0.04658	0.15
2º piso	19.9E-05	12	1.66E-05	0.04688	0.08
3º piso	14.2E-05	12	1.18E-05	0.03251	0.03
EA4,EP4					
1º piso	20.0E-05	12	1.67E-05	0.04693	0.08
2º piso	20.0E-05	12	1.67E-05	0.04693	0.08
3º piso	20.0E-05	12	1.67E-05	0.04693	0.08
(EZ1,ECD1)					
EA12,EP12					
1º piso	18.0E-05	6	3.00E-05	0.04389	0.30
2º piso	11.1E-05	6	1.85E-05	0.04756	0.11
3º piso	9.06E-06	6	1.51E-06	0.21747	0.00

EA13,EP13					
1º piso	10.0E-05	6	1.67E-05	0.0394	0.01
2º piso	10.0E-05	6	1.67E-05	0.0394	0.01
3º piso	10.0E-05	6	1.67E-05	0.0394	0.01

É notório que em alguns circuitos existem problemas de uniformidade na distribuição dos caudais antes até destes chegarem aos distribuidores de saída, visto que os caudais totais que chegam aos distribuidores são algo diferentes de piso para piso num mesmo circuito. Estas diferenças nascem de má distribuição ao longo da malha de mangueiras e de divisores e por isso somente podem existir nos circuitos onde a malha é ramificada por nós. Nas malhas onde existe uma bomba por piso, i.e. alimentação direta, os caudais na entrada do distribuidor não diferem entre si. Sugere-se assim a aplicação de correções nos nós da malha de mangueiras por forma a melhorar a distribuição dos caudais feita pelo conjunto dos pisos. O uso de distribuição por gravidade pode não ser aconselhável efetivamente se a distribuição prévia nos nós da malha não for uniforme. De qualquer forma será necessário testar em protótipo como funcionam estas tinas de distribuição por gravidade. Para efeitos deste trabalho o parâmetro relevante a considerar relacionado com a distribuição dos caudais nas saídas dos distribuidores é a altura de escoamento que proporcionam às calhas da zona 2, o que será em tópico respetivo.

O *escoamento interno em pressão* é todo simulado em FS e a sua distribuição de caudais nas saídas dos distribuidores de pressão depende do campo das pressões mecânicas estabelecido no interior dos distribuidores.

Apresentam-se nas tabelas seguintes os caudais volúmicos de escoamento nas saídas de cada distribuidor de pressão empregue, discriminados pelo seu circuito, e com os resultados agregados pelo condutor de crescimento de zona 2 que servem.

Tabela 29 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ3,ECD3), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.

Circuito	EZ ₃ ,ECD ₃											
Distribuidor	pdp						wtrhldr					
Configuração	EZ1,ECD1			EZ2,ECD2			EZ3,ECD3			EZ4,ECD4		
Piso	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º
Condutor	$Q_{vol p/saída dstrbdr} \left[\frac{m^3}{s} \right]$											
1	1.95	1.83	1.52	2.56	1.86	1.90	2.16	1.66	1.18	1.67	1.67	1.67
2	2.02	1.95	1.53	2.43	1.90	1.81						
3	2.30	1.84	1.23	2.29	1.83	1.76						
4	2.27	1.83	1.23	1.79	1.83	1.72						
5	2.12	1.67	1.27	1.34	1.75	1.72						
6	2.08	1.56	1.03	1.32	1.64	1.63						
7	2.08	1.61	9.63	1.39	1.49	1.62						
8	2.13	1.59	1.06	1.34	1.51	1.54						
9	2.12	1.53	1.15	1.32	1.48	1.55						
10	2.10	1.54	1.08	1.44	1.53	1.57						
11	2.15	1.57	1.02	1.38	1.55	1.55						
12	2.29	1.69	1.14	1.42	1.63	1.63						

Tabela 30 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ2,ECD2), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.

Circuito	(EZ2,ECD2)									
Distribuidor	bivalve		pdp						tubetree	
Configuração	EZ8,ECD8		EZ5,ECD5		EZ6,ECD6		EZ7,ECD7		EZ9,ECD9	
Lado	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
piso	$Q_{vol p/saída dstrbdr} \left[\frac{m^3}{s} \right]$									
1	0.00	0.00	1.53	1.48	0.08	0.03	0.13	0.20	2.63	2.69
2	0.00	0.00	1.60	1.44	0.80	0.87	0.83	0.89	2.17	2.17
3	0.00	0.00	1.65	1.47	1.22	1.28	1.26	1.23	1.90	1.95
4	0.00	0.00	1.69	1.55	1.48	1.49	1.50	1.48	1.67	1.65
5	2.94	2.98	1.74	1.58	1.71	1.70	1.73	1.69	1.26	1.49
6	6.32	6.37	1.82	1.62	1.98	1.92	1.94	1.94	1.36	1.39
7	8.88	8.69	1.90	1.64	2.33	2.26	2.31	2.27	1.30	1.37
8	11.6	10.7	1.89	1.72	2.62	2.48	2.52	2.46	1.29	1.26
9	13.3	13.1	1.94	1.72	2.92	2.84	2.79	2.84	1.23	1.21

Tabela 31 – Valores dos caudais volúmicos de saída para as estruturas (EZ1,ECD1), discriminados por distribuidor de saída, piso, e condutor de crescimento que servem na zona 2. Todos os valores, exceto quando apresentado em contrário, são afetados por uma ordem de grandeza de E-05.

Circuito	(EZ1,ECD1)											
Distribuidor	pdp						wtrhldr					
Configuração	EZ10,ECD10			EZ11,ECD11			EZ12,ECD12			EZ13,ECD13		
Piso	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Condutor	$Q_{vol p/saída dstrbdr} \left[\frac{m^3}{s} \right]$											
1	2.75	2.31	0.64	1.71	0.00	1.50	3.00 1.85 1.51			1.67 1.67 1.67		
2	2.30	2.03	0.04	1.71	0.49	1.57						
3	2.97	1.57	0.00	1.58	1.19	1.68						
4	3.05	1.57	2.62E-08	1.70	1.65	1.74						
5	3.04	1.65	0.56	1.64	2.55	1.74						
6	3.12	1.94	0.60	1.66	4.60	1.77						

Zona 2: Zona de crescimento das Plantas

A zona 2 inclui unicamente os canais de crescimento. Canais de secção retangular e perfil inclinado, perfurados na face superior para o encaixe das plântulas e do seu meio de suporte. Transportam a solução nutritiva no fundo da sua face interior na forma de uma película de água. As características do escoamento que se desenvolve são o resultado da hidráulica do escoamento em canal aberto e por isso são uma função da qualidade das variáveis apresentadas na tabela (23). Numa primeira análise, são estas variáveis físicas que vão controlar o sucesso fisiológico do

crescimento das plantas. Antes de mais, deve-se referir, que o intervalo de 1-3 mm³⁸ de altura da superfície livre da película nutritiva no canal, é apontado por produtores comerciais e domésticos como um valor de referência para o bom funcionamento do crescimento nas calhas, permitindo ao rizoma das plantas estar imerso em suficiente solução para absorver nutrientes, mas estar emersa o suficiente para absorver oxigénio.

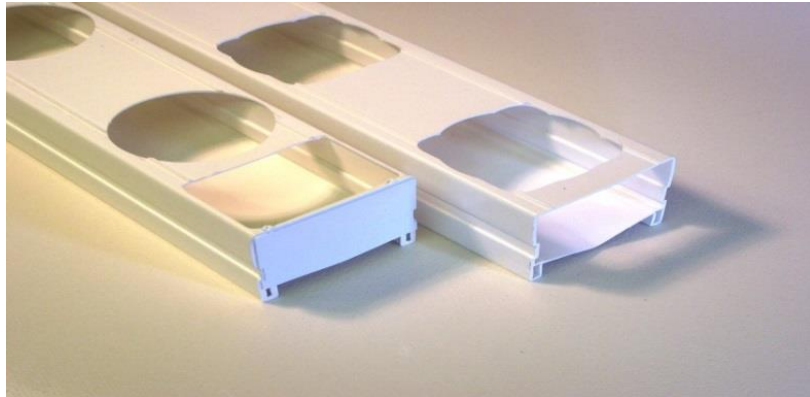


Figura 45 – Canais de crescimento de secção retangular para plantas em técnica NFT. (<http://www.vefi.no/channels-gutters/category165.html>)

O escoamento em canal aberto é conduzido por gravidade. É a transformação ponto a ponto, na direção do escoamento, da energia potencial gravítica das cotas em energia cinética e perdas mecânicas.

Quando o caudal de água entra num canal prismático inclinado, o escoamento vai passar por uma primeira fase de intensa turbulência antes de sentir por completo a sua geometria. Após sentir a geometria - a largura de escoamento, o declive e a rugosidade - o escoamento vai apanhar a geometria e preencher a largura da secção. A partir daqui é o balanço das acelerações sobre o fluido, ponto a ponto, na direção do escoamento, que dita as suas características.

Enquanto a componente da aceleração da gravidade que é paralela ao fundo do canal for superior à aceleração do atrito, a resultante da aceleração do fluido, na secção, é positiva, e a velocidade do fluido aumenta na direção do escoamento.

Como há conservação do caudal de massa secção a secção e admitindo conservação da densidade do fluido, é correto concluir que a área da secção transversal de fluido vai diminuir, segundo a direção do escoamento, em resposta.

$$v(x) = \frac{\dot{m}_{massa}}{\rho \times A(x)_{secção transversal}} \quad (44)$$

, x é definido como a direção longitudinal do escoamento, alinhada com o eixo horizontal médio na face inferior do canal, e ρ é a densidade do fluido, novamente equivalida à densidade da água a 10°C.

³⁸ www.1-hydroponics.co.uk/top-tips/nft.htm

Como a largura do escoamento já está definida para a largura do canal, a variação na sua área da secção reta, tem de resultar da variação na altura do escoamento na secção, segundo,

$$A(x)_{\text{secção transversal}} = b_{\text{largura do canal}} \times y(x)_{\text{altura da superfície livre do escoamento}} \quad (45)$$

, daqui, conclui-se que a altura da *superfície livre* do escoamento vai seguir um perfil decrescente enquanto o perfil de velocidade do fluido aumentar, i.e., enquanto o fluido for acelerado em x .

Este perfil crescente de velocidade faz crescer por sua vez a aceleração do atrito, que é proporcional à velocidade, e assim a aceleração do atrito também aumenta no sentido do escoamento. Como a componente da aceleração da gravidade que é paralela ao fundo do canal, é uma constante em x , então o seu módulo há-de ser igualado pela aceleração do atrito em algum ponto do comprimento do canal - atendendo a que este seja suficientemente longo; Nesta altura a resultante das acelerações sobre o fluido toma valor nulo e o escoamento dá-se por inércia a velocidade constante v_n . Como a partir desta secção, marcada em x , a velocidade $v(x)$ passa a ser constante, a altura do escoamento $y(x)$ também passa a ser constante e o declive do perfil da *superfície livre* relativo ao perfil do fundo do canal, passa a valer zero. Neste momento diz-se que se atingiu o *escoamento normal* com altura y_n .

Assumiui-se, para as calhas estudadas, que estas são suficientemente longas para que o escoamento em condições normais se estabeleça na maioria do seu canal, e ocorra como o modo dominante de escoamento ao longo do trajeto.

Deve-se ter em atenção, no entanto, que num canal prismático que termina em queda livre, a partir do momento em que se estabelece o escoamento normal no trajeto de escoamento, ele somente se mantém inalterado, enquanto o escoamento for *supercrítico*, i.e. o seu *número de Froude* for,

$$Fr > 1 \quad (46)$$

O *número de Froude* pode ser lido como a razão entre a velocidade do escoamento na secção reta do escoamento em canal aberto e a velocidade de propagação de uma perturbação na sua superfície livre.

$$Fr = \frac{v(x)}{\sqrt{g \times \gamma(x)}} \quad (47)$$

Quando o escoamento é supercrítico,

$$v(x) > \sqrt{g \times \gamma(x)} \quad (48)$$

, i.e. o módulo da sua velocidade na secção reta é superior ao módulo da velocidade de propagação da sua perturbação à superfície. Neste caso, se tivermos uma perturbação na superfície, introduzida por um elemento no final do canal, como uma queda livre - que só se pode propagar para montante do trajeto do escoamento que a gerou - é fácil determinar que a perturbação nunca vai conseguir viajar para fora da vizinhança do seu elemento, visto que a resultante das velocidades na sua vizinhança é favorável à direção para jusante trazida pelo escoamento inercial, que se sobre impõe ao escoamento desejado para montante por parte da perturbação. Como a

perturbação não consegue viajar para montante, o escoamento a montante não é afetado pela perturbação gerada, e o seu perfil de superfície, também não é afetado pela perturbação gerada. E.g. um escoamento normal, manter-se-ia normal, até chegar à queda livre.

Rearranjando as equações (44), (45) e (47) podemos chegar às seguintes relações que caracterizam as condições para as quais o escoamento normal é supercrítico, i.e., inalterado pelas perturbações a jusante,

$$Y_n < \left(\frac{\dot{m}_{volume}}{b \times \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (49)$$

$$Y_c = \left(\frac{\dot{m}_{volume}}{b \times \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (50)$$

$$Y_n < Y_c \quad (51)$$

, Y_c é o valor de $y(x)$ na posição x onde e quando o valor de Fr vale 1, momento em que se diz que o escoamento atingiu o seu modo *crítico*.

Se, $Y_n > Y_c$, $Fr < 1$, o escoamento é *subcrítico* e a perturbação gerada no fluido pode viajar para montante, sobrepondo-se e alterando o perfil de escoamento do canal a montante da perturbação.

No caso do nosso canal em estudo, que termina em queda livre abrupta, a leitura da perturbação

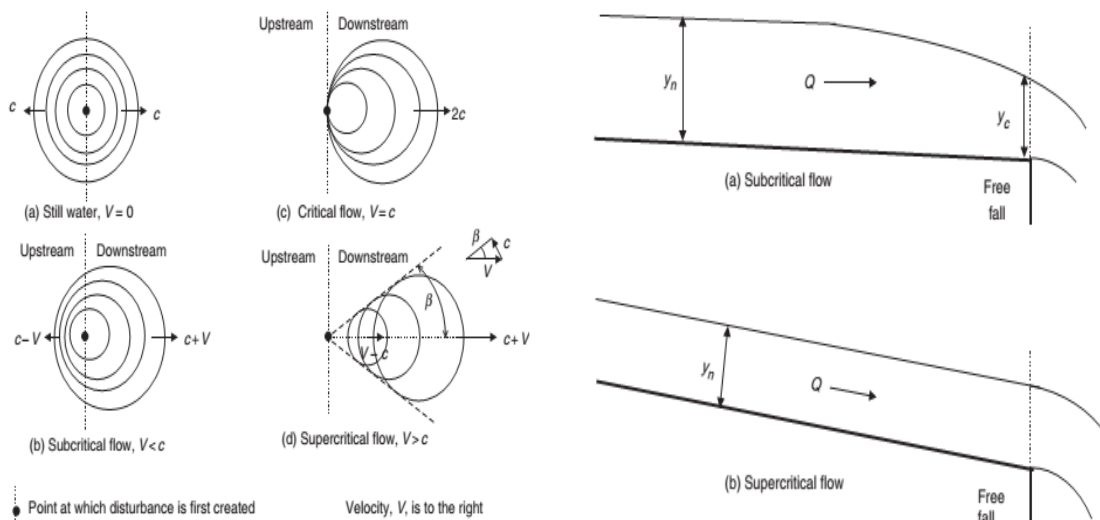


Figura 46 - Ilustração da relação do número de Froude com as velocidades de propagação do escoamento e da perturbação no canal (esquerda); Impacto do número de Froude no perfil do escoamento perturbado por queda livre (direita). Imagens retiradas de [16].

dos perfis de escoamento, tem de ser feita, para se poder determinar de que forma o perfil de *superfície livre* varia no canal, i.e., que alturas de superfície livre estão presentes. É este perfil que permitirá calcular a altura do escoamento no canal e o volume de água em permanência nas calhas – dois dos parâmetros de desempenho necessários de estudar na zona2.

Deve-se de adiantar que no caso de escoamentos *subcríticos* obtidos nos escoamentos dos nossos canais de estudo, obviou-se o cálculo dos seus perfis de escoamento perturbados. Tal omissão no entanto não é relevante, porque os poucos escoamentos *subcríticos* que se desenvolvem nas calhas de escoamento, apresentam uma altura normal, y_n , fora da condição de validade anteriormente introduzida, na qual $y_n \in [1 - 3] \text{ mm}$ espessura necessários para a película de solução no canal ser viável; e portanto todo o escoamento na calha já estava comprometido no melhor dos casos.

Para se calcular y_n é necessário recorrer à expressão da fórmula empírica de *Manning* para o cálculo da velocidade do escoamento normal em canais prismáticos,

$$A_{\text{secção recta}} \times R_h^{\frac{2}{3}} = \frac{n \times \dot{Q}_{\text{vol escoamento}}}{k_n \times S_o^{\frac{1}{2}}} \quad (52)$$

, R_h é o raio hidráulico da secção reta definido para uma secção retangular como,

$$R_h = \frac{b \times y_n}{(2 \times y_n) + b} \quad (53)$$

, k_n é uma constante de valor 1, n é o *coeficiente de dureza de Manning* que caracteriza a rugosidade de uma superfície, e toma o valor de 0.011³⁹ para o PVC, e, S_o é o declive do canal prismático.

O termo do lado esquerdo da equação (52) é dependente de y_n e o termo do lado direito da equação (52) é uma constante característica do canal para um dado caudal de volume. A solução para o valor de y_n pode ser encontrada iterando a equação do lado esquerdo até convergir para o valor do termo do lado direito. Este procedimento foi aplicado às calhas estudadas para calcular os valores de y_n .

Após termos o valor de y_n podemos compará-lo com o valor calculado de y_c , calculado pela equação (50), e determinar o *número de Froude*, e a partir desse valor determinar qualitativamente como a perturbação introduzida pela queda livre no final da calha afeta o perfil da superfície livre do escoamento a montante no resto do canal. Se for *superocrítico*, y_n é uma boa primeira aproximação para caracterizar a altura do filme de água formado na calha, visto que já se admitiu considerar o *escoamento normal* como o modo dominante e significativo de escoamento na extensão do canal.

Tomou-se nota no entanto de que as alturas reais do escoamento nas calhas podem ser superiores ao valor calculado de y_n . Esta observação é justificada pelo facto de que o y_n calculado não considera a presença de uma malha densa de obstáculos ao escoamento, como o é o rizoma submerso das plantas. Neste caso a velocidade de escoamento na secção transversal diminui em todo o perfil $v(x)$ que é contactado pelo rizoma. Para que haja conservação do caudal volúmico ao longo da calha de escoamento é necessário que o perfil da área da secção transversal do escoamento respeite a relação entre $A(x)$ e $v(x)$ descrita pela equação(45). Desta leitura resulta que o perfil da área da secção transversal do escoamento no canal $A(x)$ é inversamente propocional ao perfil da velocidade $v(x)$ e como o perfil da velocidade diminui ao contactar com as raízes, o perfil da área da secção reta tem de aumentar.

³⁹ http://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html



Figura 47 – As raízes das plantas ocupam o interior das calhas de crescimento na zona2, alterando o perfil de escoamento, $y(x)$, que se desenvolve no interior das calhas.

Sabendo que a única dimensão que a área da secção transversal do escoamento pode variar é a sua altura, é imediato que em todas as posições em x ao longo da calha onde o rizoma contactar com a água, a altura $y(x)$ do escoamento vai aumentar. Assim um escoamento que em meio desobstruído tivesse uma altura normal y_n , passa a ter um perfil $y(x) > y_n$ no meio obstruído.

Para o trabalho em discussão não se calculou o efeito da obstrução do rizoma no perfil da altura livre dos escoamentos nos canais de crescimento. Sem este cálculo é impossível determinar qual a verdadeira altura do escoamento nas calhas e se pertence ao intervalo de referência definido. Realça-se a importância de realizar este cálculo num trabalho futuro. Para efeitos do presente trabalho, a altura normal y_n , foi tomada como a altura característica da espessura dos escoamentos nos filmes de água presentes na zona2.

Como já se fez notar, a comparação deste valor com o intervalo de referência, 1-3 mm, foi a base para a avaliação do escoamento na calha como em *viável* ou *inviável*. As calhas com escoamentos *inviáveis*, i.e., fora do intervalo, foram consideradas inúteis para efeitos de produção e representam plantas que não vão crescer adequadamente, estando a ocupar espaço no circuito e a bloquear radiação para outras plantas, bem como são suportes potenciais de doenças ou pragas. Desta leitura nasce o parâmetro, % calhas: $y_n \in [1: 3]mm$, desenvolvido na tabela que descreve os parâmetros de estudo zonais (tabela 21).

Do conjunto da discussão apresentada é-nos agora possível retirar a identificação de cinco variáveis de controlo hidráulico, que em particular, regulam fortemente o desempenho produtivo das calhas de crescimento.

Tabela 32 – Parâmetros de controlo hidráulico que governam a qualidade dos escoamentos na zona 2.

	Descrição da variável	Impacto na qualidade do escoamento
α_1	inclinação do canal	$y(x); v(x)$
α_2	comprimento do canal	Depleção de nutrientes ao longo do canal
α_3	caudal volumico de água no canal	$y(x); v(x)$
α_4	largura do canal	$y(x); v(x)$
α_5	rugosidade da superfície	Impedimentos ao fluxo; formação de zonas de águas paradas; depleção de oxigénio

Como discutido nos parágrafos anteriores as relações entre estes parâmetros são complexas e traduzem-se no desempenho das plantas no que respeita à absorção de nutrientes, oxigénio e água. Apesar das relações hidráulicas permitirem traçar perfis de altura e velocidades de escoamento ao longo dos canais é necessário relacionar estes parâmetros com aspetos fisiológicos nas plantas. Tais relações não foram exploradas neste trabalho de forma analítica, tendo-se usando, em vez disso, sugestões empíricas provenientes do ramo comercial, relativas à geometria das calhas e ao seu bom desempenho.

Algumas fontes sugerem o uso de declives entre 1.3% e 2%.⁴⁰ Alguns chegam a propor 2.5%-3%. Declives mais baixos permitem a geração de zonas mortas de escoamento, em locais onde as irregularidades na superfície do canal criam depressões. Estas zonas mortas são zonas de depleção de oxigénio que criam limites ao desenvolvimento das raízes. Para evitar estas depressões, para além do declive adequado, é importante escolher materiais para as calhas que possuam superfícies suaves e lisas com alturas de rugosidade baixas, como o PVC. As calhas que foram utilizadas nas simulações deste trabalho são em PVC, dispostas com declives superiores a 1.5% e inferiores a 2.5%.

A largura da secção reta é importante para limitar o entupimento do canal por parte das raízes que se estiverem num canal apertado vão-se adensando e podem impedir o escoamento a jusante por completo. Calhas de 60, 80, 100 e 150 mm são comuns em circuitos de hidroponia, tipicamente com alturas de 40 a 60 mm⁴¹. No estudo utilizámos calhas tipicamente com 10cm de largura.

O comprimento das calhas é muito relevante porque a área da superfície exposta pelo rizoma à água que escoar é de vários metros quadrados para uns poucos metros de comprimento da calha. Toda esta área de raiz absorve profusamente oxigénio e nutrientes da solução e ao fim de passar por algumas plantas no canal, esta água, em escoamento, já vai pobre de oxigénio e nutrientes, limitando o desenvolvimento das plantas a jusante. Por esta razão alguns produtores sugerem comprimentos curtos a rondar os 3m⁴². Outros mantêm que até 10m as limitações de carga nutritiva e de oxigenação não são importantes⁴³. Para o caso de canais mais compridos deve-se considerar o uso de várias alimentações de solução dispostas ao longo canal. Nas calhas simuladas optou-se por comprimentos inferiores a 6.5m.

Por último, a distribuição dos caudais volúmicos de água pelas calhas da zona 2 depende exclusivamente da distribuição dos caudais volúmicos de água à saída da zona 1 que já foram apresentados anteriormente.

Na tabela 32 apresentam-se os parâmetros de controlo hidráulico que governam o escoamento na zona 2, e na tabela 33 apresentam-se as variáveis de circuito que expressam estes parâmetros no estudo das suas estruturas, já com os valores que lhes vêm atribuídos, (em cada circuito).

⁴⁰ http://www.cropking.com/nft_lettuce1.shtml

⁴¹ http://www.hort.vt.edu/ghvegetables/documents/Hydroponics/Nutrient%20Film%20Technique%20Lettuce_LMorgan.pdf

⁴² http://www.cropking.com/nft_lettuce1.shtml

⁴³ <http://www.hydroponics.com.au/issue-04-nft-culture/>

Tabela 33 – Variáveis de controlo hidráulico usadas no controlo dos escoamentos da zona2 e a efetiva atribuição em cada circuito.

	$\dot{Q}_{\text{idealizado/condutor_da_zona_2}}$ [L/min]	S_0 [°]	S_0 [%]	$b_{\text{largura interna canal}}$ [cm]	$h_{\text{interna canal}}$ [cm]	L_{canal} [m]	n_{Manning} (PVC)
EZ3,ECD3	1	1.4	2.4	10	5	2.11	0.011
EZ2,ECD2	1	1.1	2	10	3	3.03	0.011
EZ1,ECD1	1	1	1.7	10	5	6.4	0.011

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores das alturas normais dos perfis de *superfície livre* como foram calculados para todas as calhas de crescimento de todos os circuitos estudados no presente trabalho, assumindo as características de escoamento apresentadas na tabela33. Estes cálculos foram feitos usando os métodos discutidos anteriormente e os valores dos caudais volúmicos usados nas calhas são obtidos dos caudais volúmicos distribuídos nas saídas da zona 1, como expostos nas tabelas (27), (28), (29), (30).

No desenho das tabelas, os valores de y_n respeitam um código de cores que identifica o par ($Fr : y_n \in [1 - 3]mm$) ao qual pertence o seu escoamento.

Fr > 1 : $y_n \in [1 - 3]mm$	Fr < 1 : $y_n \in [1 - 3]mm$	Fr > 1 : $y_n \notin [1 - 3]mm$	Fr < 1 : $y_n \notin [1 - 3]mm$
---------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Figura 48 – Código de cores do par ($Fr : y_n \in [1 - 3]mm$) como aplicado ao desenho das tabelas 33, 34 e 35.

Tabela 34 – $Y_n[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ₃, ECD₃.

Circuito	EZ ₃ , ECD ₃											
Distribuidor	pdp						wtrhldr					
Configuração	EA ₁ , EP ₁			EA ₂ , EP ₂			EA ₃ , EP ₃			EA ₄ , EP ₄		
Piso	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Condutor	y _n [mm]											
1	1.22	1.17	1.05	1.44	1.19	1.21	1.30	1.11	0.90	1.11	1.11	1.11
2	1.25	1.22	1.05	1.40	1.21	1.17						
3	1.35	1.85	0.93	1.35	1.17	1.15						
4	1.34	1.18	0.93	1.16	1.17	1.13						
5	1.28	1.11	0.95	0.97	1.14	1.13						
6	1.27	1.05	0.83	0.96	1.10	1.10						
7	1.27	1.09	0.80	0.99	1.04	1.09						
8	1.29	1.08	0.85	0.97	1.05	1.06						
9	1.29	1.05	0.89	0.97	1.03	1.06						
10	1.28	1.06	0.86	1.01	1.05	1.07						
11	1.30	1.07	0.82	0.99	1.06	1.06						
12	1.35	1.12	0.88	1.01	1.10	1.09						
N° calhas com y _n inválido	10			6			12			0		
% calhas: y _n ∈ [1: 3]mm	72			83			67			100		

Tabela 35 - $Y_n[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ_2, ECD_2 .

Circuito	EZ_2, ECD_2									
Distribuidor	bivalve		pdp						tubetree	
Configuração	EA_5, EP_5		EA_6, EP_6		EA_7, EP_7		EA_8, EP_8		EA_9, EP_9	
Lado	Esquerd a	Direit a	Esquerd a	Direit a	Esquerd a	Direit a	Esquerd a	Direit a	Esquerd a	Direit a
Piso	$y_n[mm]$									
1	0.00	0.00	1.14	1.11	0.19	0.11	0.26	0.33	1.58	1.60
2	0.00	0.00	1.17	1.08	0.76	0.80	0.78	0.82	1.42	1.40
3	0.00	0.00	1.19	1.11	0.99	1.02	1.05	1.00	1.30	1.32
4	0.00	0.00	1.20	1.14	1.11	1.12	1.12	1.12	1.20	1.19
5	1.68	1.70	1.23	1.17	1.22	1.21	1.22	1.21	1.01	1.12
6	2.70	2.70	1.26	1.17	1.33	1.35	1.31	1.31	1.07	1.07
7	3.30	3.27	1.29	1.19	1.47	1.44	1.46	1.44	1.03	1.06
8	3.90	3.72	1.29	1.23	1.57	1.52	1.54	1.51	1.02	1.01
9	4.23	4.20	1.32	1.23	1.67	1.65	1.63	1.65	0.99	0.99
N° calhas com y_n inválido	14		0		5		5		2	
% calhas: $y_n \in [1:3]mm$	22		100		72		72		89	

Tabela 36 - $Y_n[mm]$ dos escoamentos nas calhas da zona 2 para as várias configurações de zona 1 dos circuitos EZ_1, ECD_1 .

Circuito	EZ_1, ECD_1											
Distribuidor	pdp						wtrhldr					
Configuração	EA_{10}, EP_{10}			EA_{11}, EP_{11}			EA_{12}, EP_{12}			EA_{13}, EP_{13}		
Piso	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Condutor	$y_n[mm]$											
1	1.67	1.50	0.69	1.25	0.00	1.16	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
2	1.50	1.39	0.13	1.25	0.59	1.19	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
3	1.75	1.19	0.00	1.19	1.00	1.24	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
4	1.78	1.19	0.03	1.24	1.23	1.26	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
5	1.78	1.23	0.64	1.22	1.59	1.26	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
6	1.80	1.35	0.67	1.23	2.28	1.28	1.76	1.31	0.29	1.23	1.23	1.23
N° calhas com y_n inválido	6			2			6			0		
% calhas: $y_n \in [1:3]mm$	67			89			67			100		

Zona 3: Zona de Coleção

A zona 3 é constituída pelos equipamentos de coleção, da água, que vem das calhas de crescimento da zona 2. Esses equipamentos podem ser combinações de condutores, coletores e depósitos. Quando se fez uso de condutores de coleção, definiu-se que haveria um por piso de produção, coletando toda a água do piso, e desaguando para um coletor comum (a todos os pisos), de secção interior larga, cujo propósito não é desenvolver escoamentos de grande especificidade

mas somente conduzir a água por queda livre ou em canal aberto para o depósito de coleção. Espera-se que os coletores comuns limitem o percurso dos jatos de água em queda livre, que caem dos condutores de coleção, forçando-os a escorrer pelas paredes dos coletores, diminuindo assim as dimensões de recolha necessárias para o depósito de coleção, posicionado no solo.

Deve-se dizer que os circuitos EZ_2, ECD_2 não possuem condutores de coleção na zona 3, porque as suas calhas de crescimento da zona 2, escoam diretamente para o coletor comum do circuito, que conduz a solução ao depósito. Os circuitos EZ_3, ECD_3 e EZ_1, ECD_1 têm ambos condutores de coleção, coletor comum e depósitos.

Os condutores de coleção operam em regime de canal aberto e são de forma parabólica. Os seus escoamentos são puramente gravíticos como na zona 2. No entanto, o caudal volumétrico não é constante ao longo do escoamento, sendo sim gradualmente variado ao longo do canal. Isto acontece porque a calha de coleção, posicionada longitudinalmente ao longo das saídas dos canais de crescimento da zona 2, vai coletando solução, progressivamente, à medida, que o seu escoamento se desenvolve na direção longitudinal da calha.

O parâmetro de desempenho, importante de determinar para a zona 3, corresponde unicamente ao volume de água em permanência na zona. Para este cálculo, duas análises seriam necessárias. Uma que estudasse o perfil de alturas da superfície livre nas calhas de coleção, que possuem um caudal gradualmente variado, e outra, que estudasse o escoamento em queda livre e nas paredes, no interior do coletor comum. Com exceção do escoamento em queda livre, os cálculos para estas análises não são triviais. No entanto podemos considerar o seguinte: se o volume total de água nas calhas de coleção da zona 3, for semelhante ao volume total de água nas calhas de crescimento da zona 2 - admitindo a título de argumento que todas as calhas de crescimento na zona 2 tem um escoamento normal com 3 mm de altura - obtemos os seguintes volumes de água para as calhas de crescimento e por hipótese para as calhas de coleção.

Tabela 37 - Volumes de água hipotetizados para os escoamentos nas calhas de crescimento e de coleção, das zonas 2 e 3, respectivamente.

<i>circuitos</i>	$N_{calhas\ crescimento\ zona\ 2}$	$b_{largura\ interna\ canal}$ [m]	y_n [m]	L_{canal} [m]	$V_{H_2O\ calhas}$ [m ³]	$V_{H_2O\ zona\ 2,3}$ [m ³]
EZ_3, ECD_3	36	0.1	0.003	2.1	0.023	0.045
EZ_1, ECD_1	18	0.1	0.003	6.4	0.035	0.069

Se considerarmos agora um depósito de coleção de água com um volume de água de $0.47 \times 1.06 \times 0.3\ m^3$ em (X,Y,Z), temos $0.15\ m^3$ de água. O depósito de alimentação terá igual volume, e assim temos, um volume total de água nos depósitos de $0.3\ m^3$; o que é 4.35 – 6.67 vezes maior que o volume total de água agregado nas calhas de coleção e nas calhas de crescimento dos circuitos.

Comparando a dimensão do volume total de água nos depósitos de alimentação, mais nos de coleção, com os volumes totais de água nas calhas de crescimento, mais nas de coleção, somos levados a sugerir que o volume de água presente no circuito é largamente dominado pelo volume de água presente nos depósitos do circuito. Negligenciou-se assim o cálculo analítico dos volumes de água nas zonas 2 e 3 para efeitos de facilitar a análise do sistema, considerando-se unicamente para efeitos do cálculo, do volume total de água em permanência nos circuitos, as contribuições dos volumes de água presentes nas zonas 1 e 4 dos mesmos. Assume-se que foi cometido um erro

de precisão, mas pensa-se que a exatidão do resultado não terá sido comprometida, nem a ordem de grandeza respetiva.

Em futura revisão do trabalho, em que se pretenda maior rigor na determinação do volume de água no circuito, devem-se recorrer a métodos de análise apropriados para o referido cálculo, nas zonas 2 e 3 do circuito.

Zona 4: Zona de Realimentação

A zona de realimentação é responsável por bombear água do depósito de coleção da zona 3, para o depósito de alimentação da zona 1, e o dimensionamento das suas bombas é feito de forma idêntica ao que foi discutido para a zona 1. A realimentação dos circuitos consiste de uma bomba e de um condutor que liga os dois depósitos. A saída do condutor está exposta à pressão atmosférica e o condutor foi desenhado em SW para se poder simular as características do seu escoamento em FS.

Para cada circuito, o caudal que é escoado ao longo da zona 4 é de igual valor ao caudal que é bombeado na entrada da zona 1 (tabela 24); A determinação da pressão total à entrada da bomba de realimentação no depósito de coleção vem da aplicação da *equação de Bernoulli* entre a *superfície livre* da água no depósito e a entrada da mesma bomba – admitindo a estacionariedade do seu escoamento; A pressão total à saída da bomba vem dos resultados da simulação em FS. Com estas pressões pode obter-se a cabeça de energia fornecida pela bomba, aplicando a equação 41 e, adicionalmente, sabendo o caudal na bomba, podemos então escolher, a partir do catálogo da *EHEIM*, a(s) bomba(s) que satisfaz(em) as condições de bombagem determinadas para a realimentação do circuito – com especificações e custo. Os volumes de água em permanência na zona 4 são obtidos a partir da leitura da geometria dos condutores construídos em SW. Relembra-se que os circuitos do tipo EZ_3, ECD_3 não tem realimentação.

Tabela 38 - Características da bombagem na realimentação de água nos circuitos.

EZ, ECD	$\dot{m}_{realimentação}$ [kg/s]	$\dot{Q}_{realimentação}$ [L/min]	$P_{saída, bomba}$ [Pa]	ΔH_{bomba} [m]	Catálogo EHEIM			
					N_{bombas}	(#), modelo	ϵ_{bombas} [€]	$P_{elétrica}$ [W]
EZ_2, ECD_2	0.29991	18.01	107181.22	0.2982	2	(2) CP 1250	200	56
EZ_1, ECD_1	0.59982	36.03	108609.81	0.4441	3	(3) CP 1250	300	84

Volumes de H_2O em permanência nos circuitos de crescimento

Como discutido anteriormente o volume de água em permanência nos circuitos considerou-se equivalente ao agregado dos volumes de água presentes nas zonas 1 e 4 do circuito - tendo-se ignorado os volumes de água nas zonas 2 e 3.

Os volumes de água em permanência na zona 1 compreendem-se da água no depósito de alimentação e da água nos condutores, divisores e distribuidores da sua rede. A água nos depósitos é calculada usando as medidas dos depósitos de alimentação, apresentadas na descrição das peças dos circuitos, no respetivo estudo gráfico, e considerando uma cota de água no depósito de 0.3 m. Os depósitos dos circuitos do tipo EZ_1, ECD_1, EZ_2, ECD_2 , são desenhados em SW e preenchidos com água, lendo-se de seguida o seu valor no volume de água.

No caso dos circuitos do tipo EZ_3, ECD_3 , existe um único depósito, que faz alimentação e coleção de água, cujo cálculo do volume de água é feito sem a necessidade de introduzir a sua geometria em SW.

A água na rede de alimentação da zona 1 é calculada igualmente pela geometria desenhada em SW, com exceção dos distribuidores por gravidade onde o volume de água é calculado usando a altura $Z_{sup livre}$ da água, discutida no tópico anterior, e a geometria do distribuidor, pela expressão,

$$V_{H_2O, dstrbr dr grav} = \left(\frac{4}{3} \times Z_{sup livre} \times \sqrt{\frac{b_{parábola}^2 \times Z_{sup livre}}{h_{parábola}}} \right) \times L_{distribuidor} \quad (54)$$

, onde $b_{parábola}$ é a largura máxima da secção transversal da parábola; $h_{parábola}$ é a altura máxima da secção transversal da parábola; e $L_{distribuidor}$ é o comprimento, na direcção longitudinal, do distribuidor.

A água nos depósitos e na rede da zona 4 é calculada novamente simulando a geometria em SW.

Nas tabelas seguintes, apresentamos os valores dos volumes de água em permanência discriminados pelos diversos componentes dos circuitos aos quais pertencem.

Tabela 39 - Volumes de água em permanência discriminados pelos diversos componentes dos circuitos aos quais pertencem.

<i>Vol. H₂O</i> permanência [m ³]	Zona 1		Zona 4	Total
	alimentação	distribuição	realimentação	
<i>EZ₃, ECD₃</i>				
<i>EA₁, EP₁</i>	0.473	0.016	--	0.489
<i>EA₂, EP₂</i>	0.473	0.016	--	0.488
1° piso	--	0.005	--	
2° piso	--	0.005	--	
3° piso	--	0.005	--	
<i>EA₃, EP₃</i>	0.473	0.039	--	0.511
<i>EA₄, EP₄</i>	0.473	0.021	--	0.493
1° piso	--	0.007	--	
2° piso	--	0.007	--	
3° piso	--	0.007	--	
<i>EZ₁, ECD₁</i>				
<i>EA₁₀, EP₁₀</i>	0.180	0.010	0.1827	0.372
<i>EA₁₁, EP₁₁</i>	0.180	0.010	0.1827	0.372
1° piso	--	0.003	--	--
2° piso	--	0.003	--	--
3° piso	--	0.003	--	--

EA_{12}, EP_{12}	0.180	0.053	0.1827	0.416
EA_{13}, EP_{13}	0.180	0.001	0.1827	0.364
1º piso	--	0.0004	--	--
2º piso	--	0.0004	--	--
3º piso	--	0.0005	--	--

EZ_2, ECD_2

EA_5, EP_5		0.0059		0.592
EA_6, EP_6		0.0054		0.591
EA_7, EP_7	0.218	0.0042	0.3674	0.590
EA_8, EP_8		0.0046		0.590
EA_9, EP_9		0.0117		0.597

Quadro-resumo do desempenho hidráulico dos circuitos

Podemos agora apresentar uma comparação direta do desempenho dos circuitos estudados no nosso trabalho, tomando em conta os seus desempenhos para os atinentes parâmetros de desempenho que foram imediatamente definidos logo no início do tópico presente. (Tabela 21)

Tabela 40 - Quadro-resumo do desempenho hidráulico dos circuitos como definido pelos devidos parâmetros de desempenho apresentados na Tabela 21.

EZ_3, ECD_3	% calhas: $y_n \in [1:3]$	Vol. H_2O permanência [m³]	$P_{elétrica}$ [W]	€ _{bombas} [€]
EA_1, EP_1	72	0.489	390	504
EA_2, EP_2	83	0.488	223	240-628
EA_3, EP_3	67	0.511	234	381
EA_4, EP_4	100	0.493	165	210-414
EZ_2, ECD_2				
EA_5, EP_5	22	0.592	320	240-308
EA_6, EP_6	100	0.591	240	180-231
EA_7, EP_7	72	0.590	156	260
EA_8, EP_8	72	0.590	66	77
EA_9, EP_9	89	0.597	234	390
EZ_1, ECD_1				
EA_{10}, EP_{10}	67	0.372	390	215-476
EA_{11}, EP_{11}	89	0.372	223	200-275
EA_{12}, EP_{12}	67	0.416	234	470
EA_{13}, EP_{13}	100	0.364	165	200-275

4. Conclusões

Não existem na literatura estudos que produzam uma análise detalhada da estrutura funcional dos circuitos hidropónicos numa lógica computacional que seja enfática das complexidades da estrutura e da sua relação com a hidráulica dos escoamentos, e destas com os parâmetros de desempenho funcional e os consumos de um circuito. Alternativamente encontram-se na literatura várias relações empíricas entre a produtividade de uma dada espécie, ou os consumos de um dado sistema, com a variação de algumas características bem definidas do circuito ao nível da sua solução nutritiva, da manutenção da sua colheita ou de alguns aspectos de controlo passivo do clima interior da unidade. Estes estudos são interessantes para encontrar eventuais *setpoints* ou intervalos de produção ótimos para a colheita, mas subentendem geralmente a fixação das restantes variáveis sem o estudo determinístico das influências várias que esses parâmetros ou outros, obviados, estabelecem entre si na determinação da resposta produtiva da planta. São portanto estudos necessários e de suma importância mas que escondem um pouco a integração de múltiplas variáveis de controlo na análise e na modelação do desempenho produtivo dos circuitos de crescimento.

É possível concluir da realização deste trabalho que existem dimensões do dimensionamento de unidades de produção hidropónicas e dos seus circuitos de crescimento que são normalmente menos apreciadas e trabalhadas como variáveis de ajuste da produtividade de um sistema de produção, mas que no entanto têm uma relação importante com a produtividade do sistema que pode ser identificada e merecer ser caracterizada. Destas, as variáveis hidráulicas e de estrutura merecem particular destaque como variáveis de desenho complexo requerentes de maior atenção, especialmente quando as escolhas a que são sujeitas influenciam determinantemente a capacidade de um sistema ser mais ou menos produtivo, logo que seja, em aspectos como a alimentação de solução e o seu bom escoamento na zona de crescimento.

Igualmente se identificou com este trabalho como é possível a partir de software computacional de simulação de fluídos fazer um cálculo rigoroso das necessidades de bombagem da alimentação dos circuitos, e adicionalmente, com análise hidráulica fundamental, identificar um volume ótimo de água em permanência no circuito, sendo que o conhecimento das necessidades em consumo de água do circuito, ambos importantes para aferir a pegada ecológica da unidade.

Para além de relações produtivas postas em evidência entre o desenvolvimento das plantas e as opções estruturais e hidráulicas do sistema, também foi possível descrever a complexidade dos sistemas de produção a nível da sua estrutura funcional, numa perspetiva de objectos lógicos relacionais. Esta descrição prepara o terreno para uma linguagem descritiva dos circuitos ao nível computacional abrindo portas para um futuro trabalho de transposição dos objectos lógicos para um software do tipo input:output orientado para o utilizador que permita simular e dimensionar circuitos de crescimento incorporando a estrutura e a hidráulica.

Fica também sugerido que é possível chegar a parâmetros de desempenho produtivo e de consumos de um circuito por um meio mais computacional que faça uso quando necessário de valores empíricos, o que sugere, que processos equivalentes de estudo, ajustados aos parâmetros desejados, podem ser reproduzidos para outras áreas de desempenho produtivo e funcional de um circuito, nomeadamente para climatização, tratamento e qualidade nutricional da solução nutritiva, captação de radiação solar, entre outros.

Desta forma avançamos como trabalho futuro o desenvolvimento, no particular, dos temas tratados neste trabalho, como sejam a refinação dos métodos de hidráulica fundamental aplicados aos estudos das alturas da superfície livre da água, incorporando os efeitos do rizoma na altura da superfície livre, e o estudo mais refinado dos volumes de água em permanência nos componentes de colecta da água por forma a caracterizar melhor o volume total em permanência. No geral é importante expandir toda a análise computacional e analítica às restantes áreas não abordadas neste trabalho, nomeadamente, a solução nutritiva (carga, oxigenação e tratamento), o meio físico interior, as características materiais e energéticas do edifício, a localização climática da unidade e a relação entre o *daylighting* e a produtividade da espécie. Adicionalmente será interessante

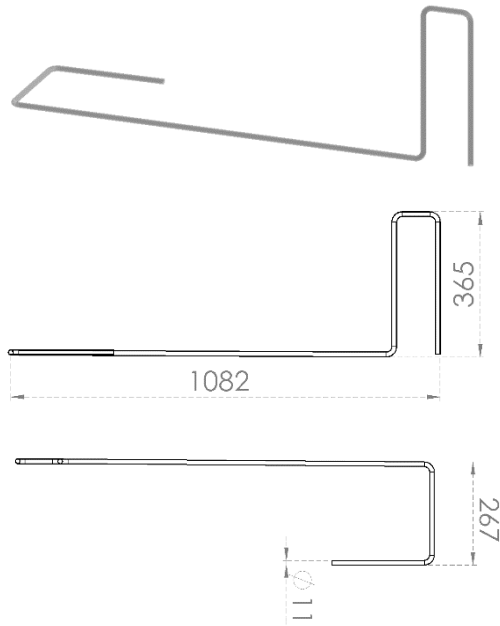
conseguir desenvolver um modelo que incorpore várias destas características e descreva a resposta produtiva de uma da espécie em função das mesmas, permitindo uma modelação e simulação de uma unidade produtiva em qualquer localização climática e com diversas estruturas.

Bibliografia

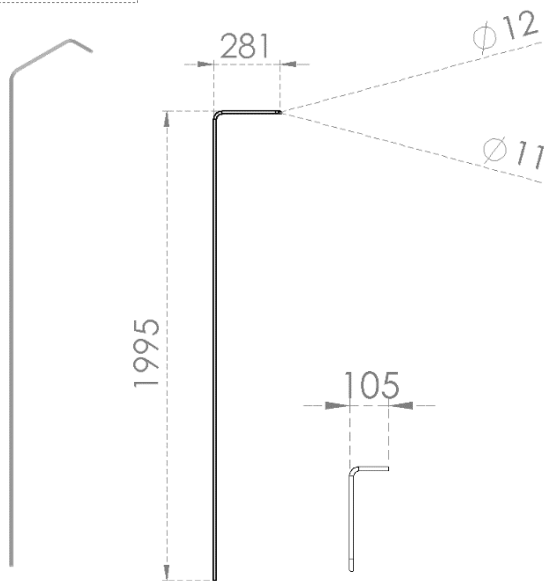
- [1] P. Santos, E. Ocampo, "SNAP Hydroponics: development & potential for urban vegetable production", *PJCS*, vol. 30, no. 2, pp. 3-11, Jun., 2005.
- [2] A.Ortiz, H.Rotatori, E.Schreiber, G.V.Roth, "Hydroponic Farming in Mahasarakham: Integrating hydroponics into the agricultural curriculum while promoting entrepreneurial skills", Mar., 2009, [Online]. Disponível: https://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-030409-225133/unrestricted/Hydroponics_Final_Report_pdf.pdf
- [3] R.M.Corrêa et al., "A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems", *Scientia Horticulturae*, vol.116, pp 17-20, 2008.
- [4] E. Costa, P.Leal, "Avaliação da biomassa foliar de morangueiro hidropônico em diferentes ambientes protegidos", *Ciências Agrotécnicas*, vol. 32, no. 6, pp. 1941-1952, Nov./Dez. 2008.
- [5] L.C.Granjeiro et al., "Produção de rúcula em hidroponia com diferentes concentrações de cobre", *Horticultura Brasileira*, vol. 21, no.1, pp 69-72, Mar., 2003.
- [6] L.Júnior, J.Araújo, T.Factor, "Análise do resfriamento da solução nutritiva para cultivo hidropônico do morangueiro", *Eng.Agríc.*, vol.24, no.2, pp 338-346, Mai./Ago., 2004.
- [7] M.M.Maboko, C.P. Du Plooy, "Effect of steam and fruit pruning on yield and quality of hydroponically grown tomato", *African Crop Science Conference Proceedings*, vol.9, pp. 27-29, 2009.
- [8] E.M.Abd-Elmoniem, M.A.Abdrabbo, A.A.Farag, M.A.Medany, "Hydroponics for food production: comparison of open and closed systems on yield and consumption of water and nutrient", *2nd International Conf. on Water Resources & Arid Environment*, 2006.
- [9] M.H.Jensen, "Controlled environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions – a world review", CEAC, CALS, Nov., 2010.
- [10] N.Gruda, "Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?", *Journal of Applied Botany and Food Quality*, vol.82, pp. 141-147, 2009.
- [11] A.J.Both, "Ten years of hydroponic lettuce research", Department of Plant Biology and Pathology, The State University of New Jersey, pp.7-14.
- [12] Lopes et. Al., "Models to estimate phytomass accumulation of hydroponic lettuce", *Sci.Agric.*, vol.61, no.4, pp.392-400, Jul./Ago., 2004.
- [13] H.C.Thompson, R.W.Langhans, A.J.Both, L.D.Albright, "Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system", *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, vol.123, no.3, pp.361-364, 1998.
- [14] D.Despommier, *The Vertical Farm – Feeding the World in the 21st Century*. Picador, Nov., 2011.
- [15] A.Jones, "An environmental assessment of food supply chains: a case study on dessert apples", *Environmental Management*, vol.30, no.4, pp. 560-576, 2002.
- [16] Y.Çengel, J.Cimbala, "Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications". McGraw-Hill, 2006.

Anexo - I

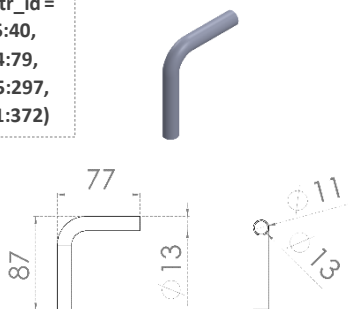
cndtr_id = (1, 80)



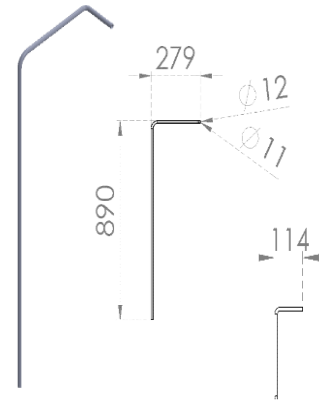
cndtr_id = 4



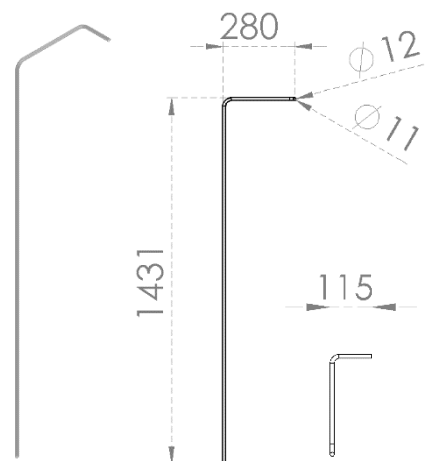
cndtr_id =
(5:40,
44:79,
225:297,
301:372)



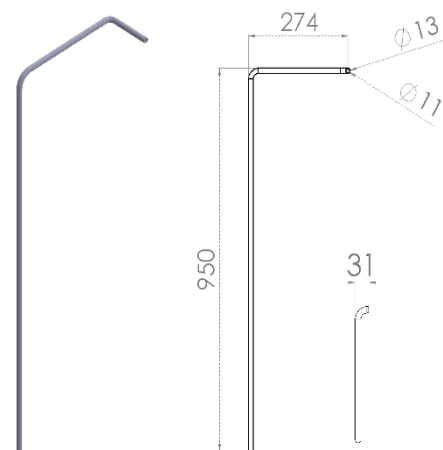
cndtr_id = 2



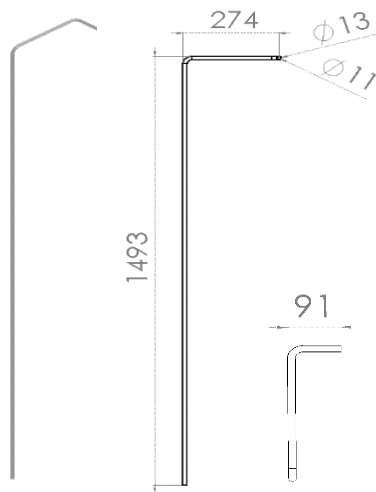
cndtr_id = 3



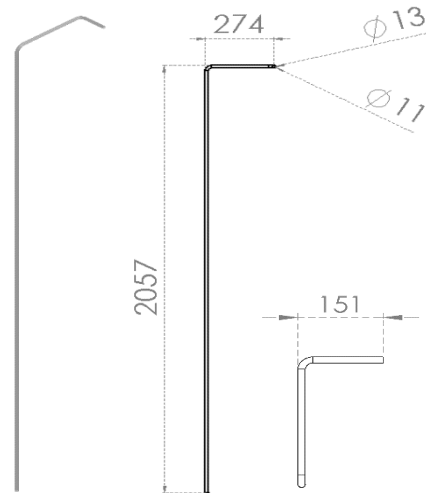
cndtr_id = 41



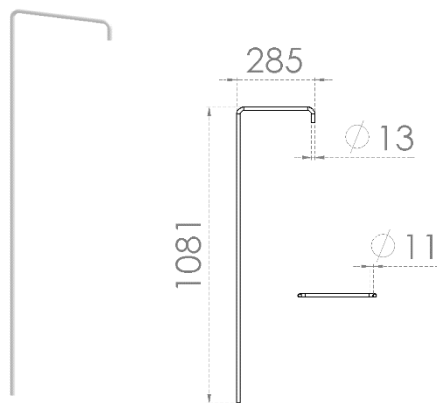
cndtr_id = 42



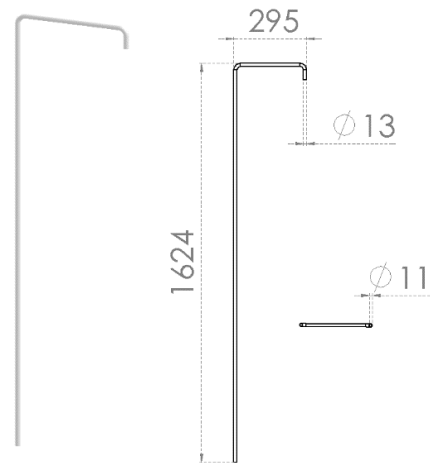
cndtr_id = 43



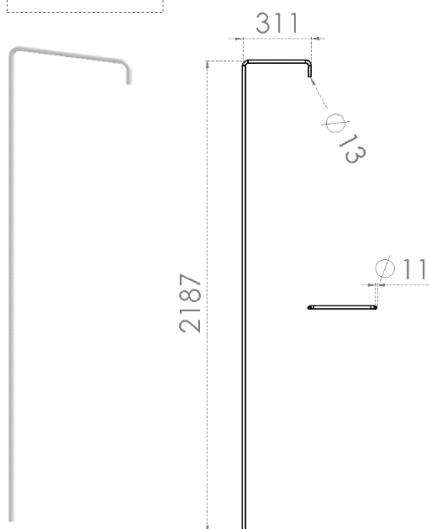
cndtr_id = 81



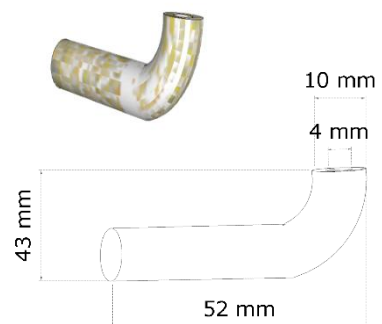
cndtr_id = 82



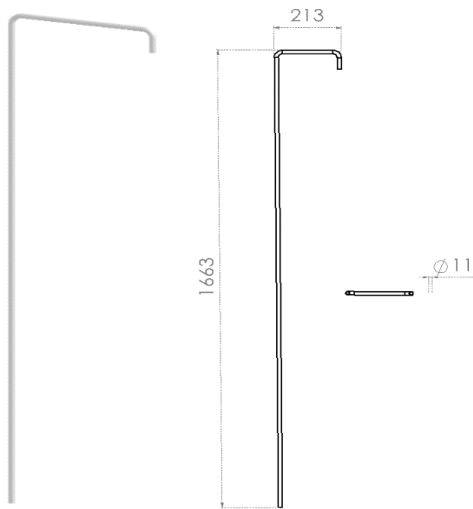
cndtr_id = 83



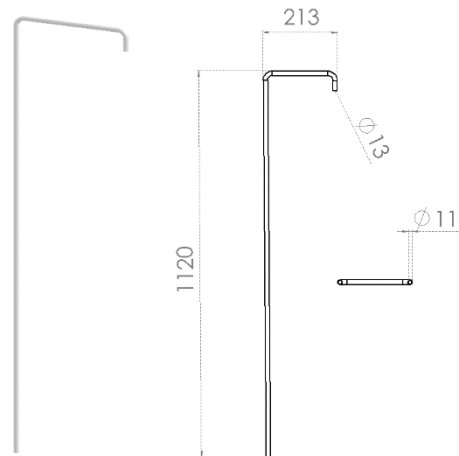
cndtr_id = (84:101, 105:122, 377:412, 416:451)



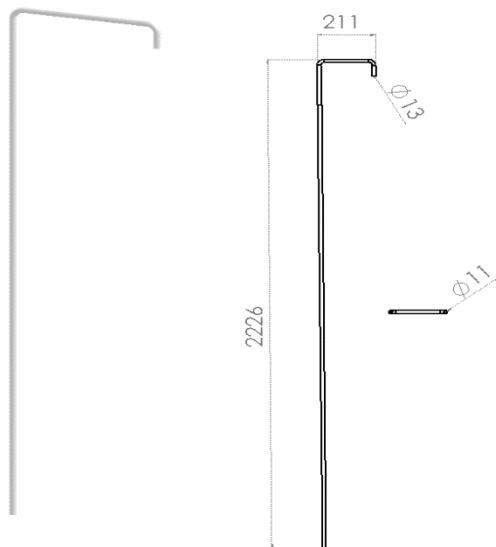
cndtr_id = 103



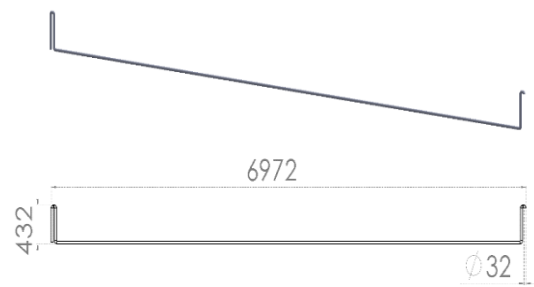
cndtr_id = 102



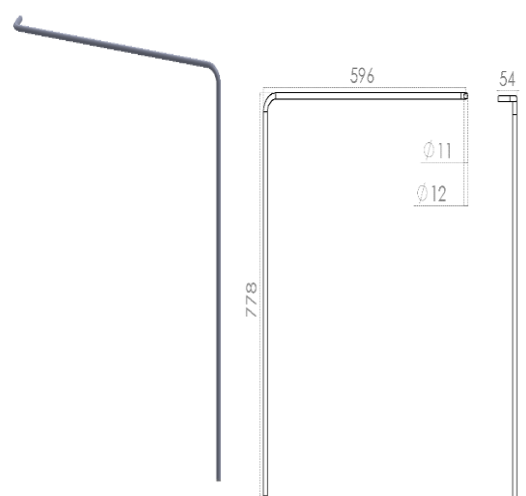
cndtr_id = 104



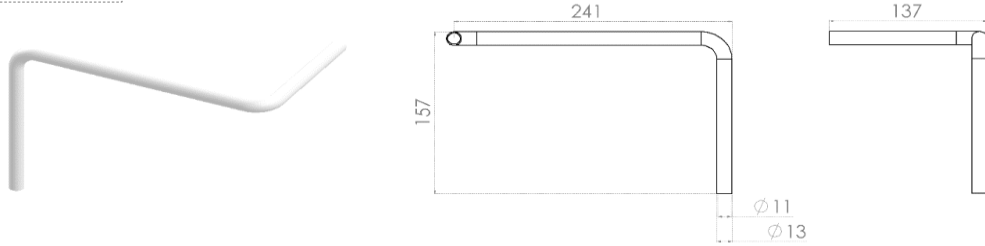
cndtr_id = (925:928)



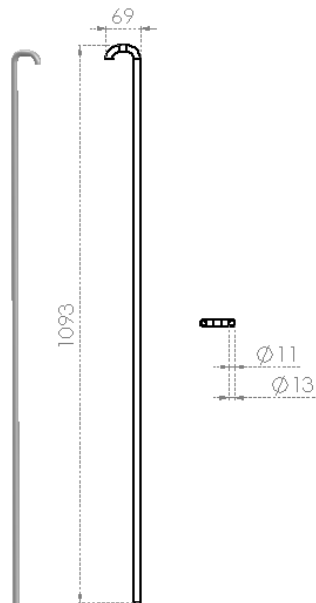
cndtr_id = (222,298)



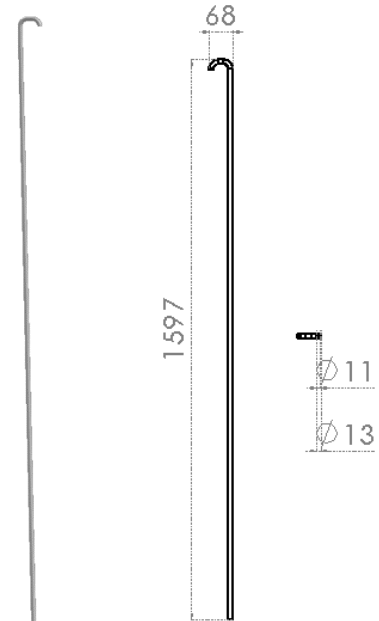
cndtr_id = (221,373)



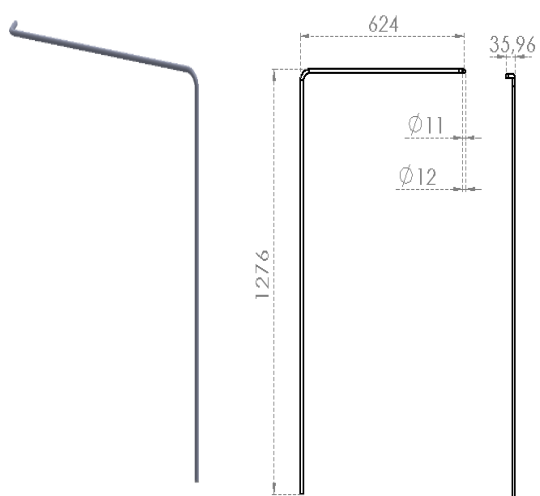
cndtr_id = 374



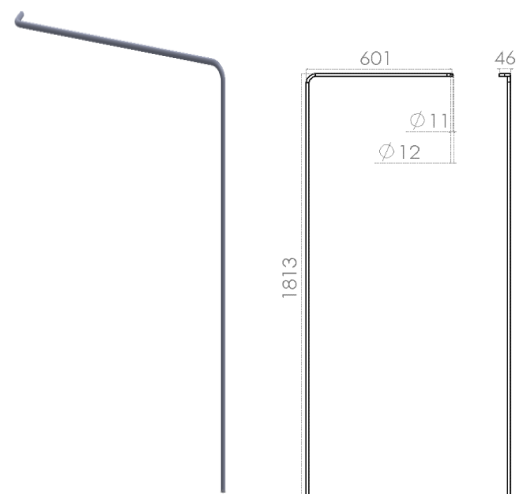
cndtr_id = 375



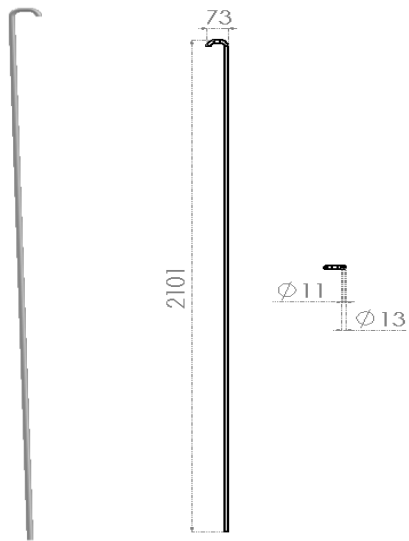
cndtr_id = (223,299)



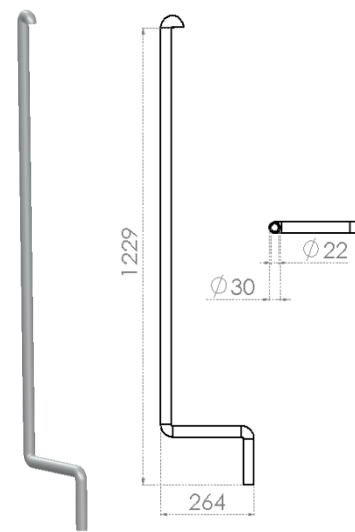
cndtr id = (224,300)



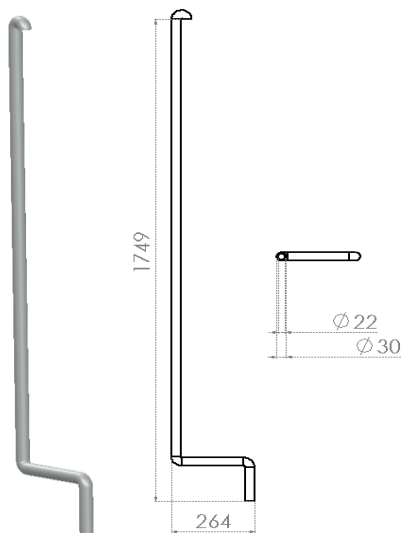
cnldr_id = 376



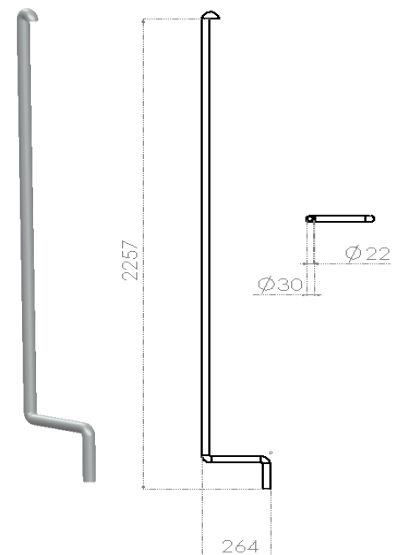
cnldr id = 413



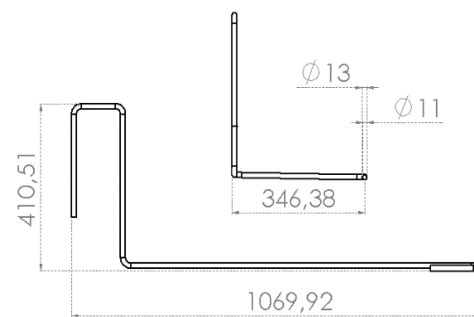
cnldr id = 414

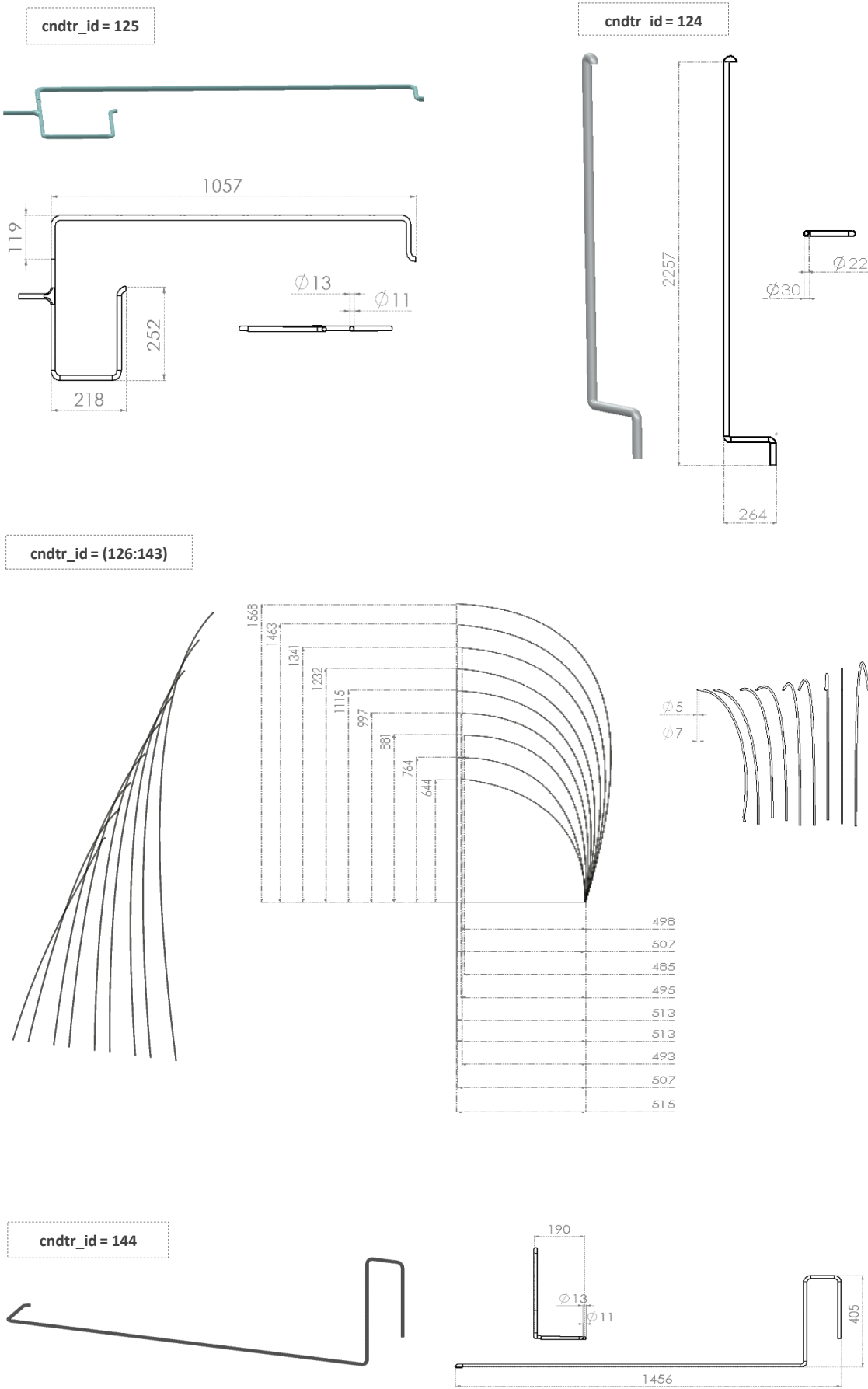


cnldr_id = 415

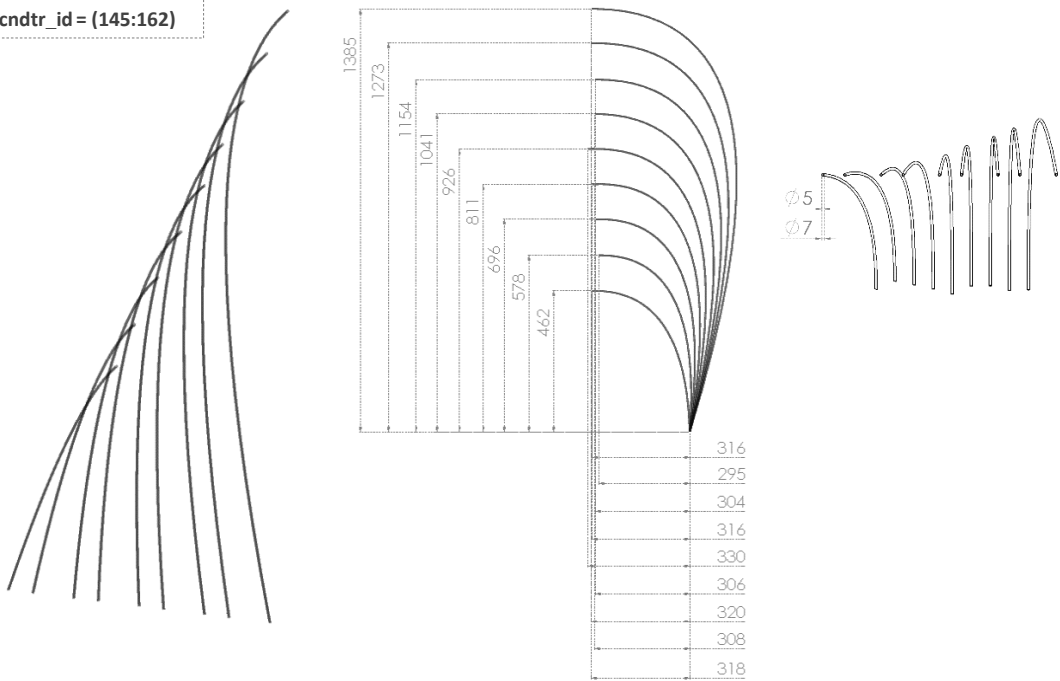


cnldr_id = 123

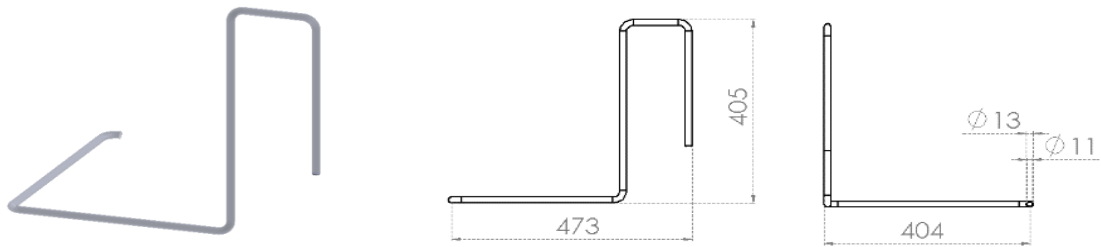




cndtr_id = (145:162)

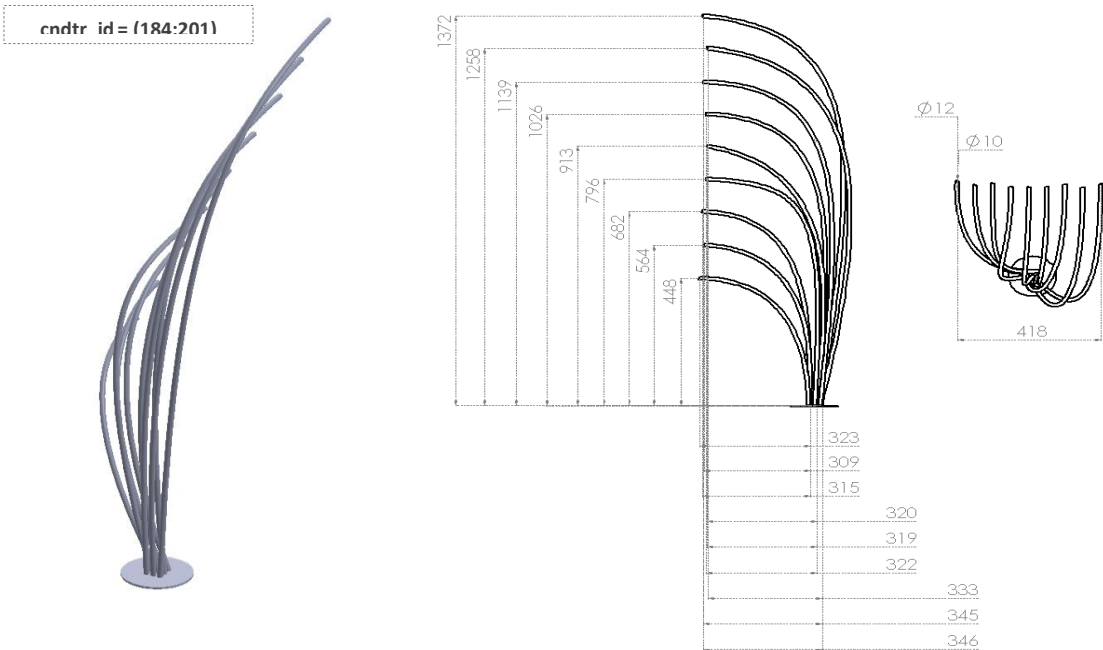
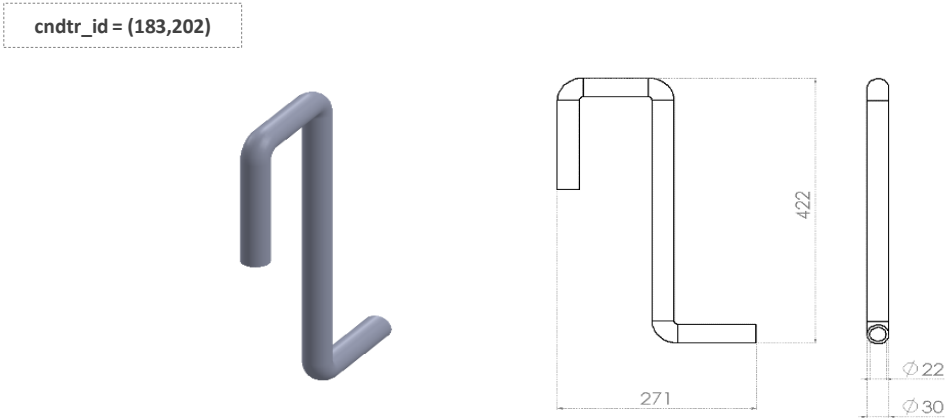
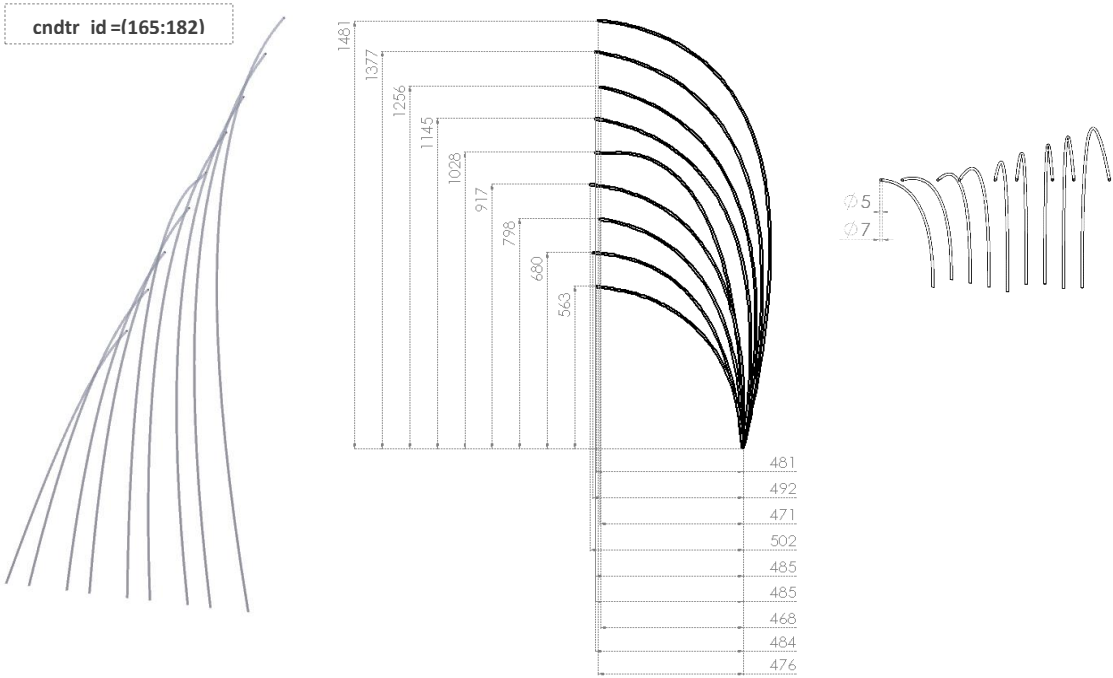


cndtr_id = 163

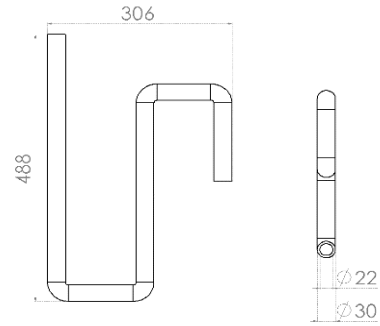


cndtr_id = 164

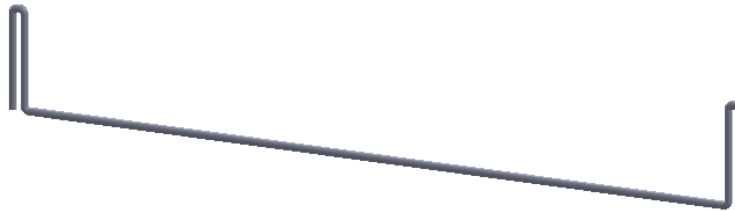




cndtr_id = 202



cndtr_id = (929:933)



cndtr_id = (203:220)

